

**REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES
Y REÚSO UTILIZANDO PLANTAS ORNAMENTALES: PROTOTIPO DIDÁCTICO DEL
LABORATORIO DE RECURSOS HÍDRICOS UNIVERSIDAD CATÓLICA DE
COLOMBIA**

**ANDREA CÁCERES SERRATO
INGRID JOHANA FONSECA**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2019**

**REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES
Y REÚSO UTILIZANDO PLANTAS ORNAMENTALES: PROTOTIPO DIDÁCTICO DEL
LABORATORIO DE RECURSOS HÍDRICOS UNIVERSIDAD CATÓLICA DE
COLOMBIA**

**ANDREA CÁCERES SERRATO
INGRID JOHANA FONSECA**

**Trabajo de Grado para optar al Título de
Ingenieras Civiles**

**Directora
Ing. Paula Andrea Villegas González
Magister en Hidrosistemas
Candidata Doctora en Ingeniería**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Nota de aceptación:

Ing. PAULA ANDREA VILLEGAS GONZÁLEZ
Directora de Proyecto

Ing.
Asesor de Proyecto

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del jurado

Fecha: 21 de octubre de 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a mi padre Edilberto Cáceres Daza que siempre me inculcó el valor e importancia de ser profesional, gracias por sus consejos ante mis dudas y vacilaciones, gracias por su colaboración en todo momento. A mi madre María Consuelo Serrato por siempre apoyarme en mis sueños, darme aliento y su apoyo incondicional con mucho amor y cariño,

A mis hermanos María Aracely Cáceres y Andrés Cáceres por alentarme y sentirse orgullosos de mis triunfos, a mis sobrinos porque me animan a ser su ejemplo para que en un futuro ellos cumplan sus sueños profesionales.

A mi querido Heliodoro Paipilla por siempre alentarme a estudiar para que yo salga adelante y brindarme su ayuda y cariño siempre.

Va dedicado especialmente a mi amigo Arturo Delgadillo por creer en mí, ayudarme ante las dificultades e impulsarme a perseguir mis sueños con pasión y humildad siempre guiándome con su serenidad y calma para tomar buenas decisiones.

A mi compañera Ingrid Fonseca por involucrarse activamente en este trabajo de investigación para contribuir con la protección del medio ambiente

Ustedes son parte fundamental en esta etapa que culmina con el logro de ser ingeniera civil, muchas gracias.

ANDREA CÁCERES SERRATO

Este trabajo de Grado es dedicado primeramente a Dios por darme la fuerza y voluntad de poder culminar mis estudios con satisfacción.

Segundo va dedicado a mi madre y mi abuela que desde el cielo siempre me dieron las fuerzas necesarias cuando me sentí derrotada y así poder continuar mis estudios con mucho cariño y dedicación.

Va dedicado a mi familia a mi padre, hermanas, por el apoyo emocional, a mi esposo por el tiempo de trasnochos y sacrificios del tiempo que no hemos podido compartir en familia, a mis suegros que con mucho sacrificio me han apoyado estos años en los trasnochos y sacrificios que valieron la pena y me hace mejor profesional y persona.

A mi compañera Andrea Cáceres por compartir las mismas ideas y enfocarnos en este proyecto que busca disminuir la contaminación y ayudar al medio ambiente.

INGRID JOHANA FONSECA P

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan sus agradecimientos a:

La ingeniera Paula Andrea Villegas por ser nuestra tutora y guía de trabajo de investigación y acompañarnos en todo este proceso con sus ideas y conocimientos que nos hacen crecer como profesionales.

Al señor Javier Mendoza quien nos colaboró con sus ideas creativas y propuestas ingeniosas para mejorar nuestro trabajo de investigación

A las ingenierías Leidy Castellanos y María Morales por impulsarnos a retomar su tesis de investigación y contribuir con las mejoras que se reflejan en este documento.

A los ingenieros Felipe Santamaría, Sebastián De Plaza, Alberto Pardo y Wilfredo Marimon Bolivar que con su punto de vista y experiencia aportaron sus observaciones constructivas y propuestas de mejoras para nuestro trabajo de investigación.

A la Universidad Católica de Colombia por ser la institución que nos permite cumplir el sueño y el logro de ser ingenieras civiles.

A la compañía ALLCHEM LTDA por brindarnos su colaboración e ideas ante las dudas presentadas en cuanto a los ensayos de laboratorio realizados.

A todas las personas que de una u otra manera aportaron un granito de arena a nuestro trabajo de investigación para que este fuera posible de realizarlo.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| GLOSARIO | 15 |
| RESUMEN | 23 |
| INTRODUCCIÓN | 25 |
| 1. GENERALIDADES | 27 |
| 1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN | 27 |
| 1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 30 |
| 1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 30 |
| 1.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA. | 31 |
| 1.3. OBJETIVOS | 31 |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL | 31 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 31 |
| 1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES | 32 |
| 1.4.1. ALCANCES | 32 |
| 1.4.2. LIMITACIONES | 33 |
| 2. MARCO REFERENCIAL | 34 |
| 2.1. MARCO TEÓRICO | 34 |
| 2.1.1. CONSTRUCCIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL A NIVEL DE LABORATORIO VIVO, EN EL PREDIO “MI RANCHITO”, EN LA VEREDA OLARTE, LOCALIDAD USME – BOGOTÁ | 34 |
| 2.1.2. DESARROLLO DE UN MICRO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ORDINARIO | 38 |
| 2.1.3. BIOPROSPECCIÓN DE PLANTAS NATIVAS PARA SU USO EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN: CASO HELICONIA PSITTACORUM (HELICONIACEA) | 42 |
| 2.1.4. ESTUDIO DE COMPARACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS UTILIZANDO LENTEJAS Y BUCHÓN DE AGUA EN HUMEDALES ARTIFICIALES. | 46 |
| 2.1.5. HUMEDALES ARTIFICIALES COMO UN MÉTODO VIABLE PARA EL TRATAMIENTO DE DRENES AGRÍCOLAS. | 51 |
| 2.1.6. USO DE PLANTAS ORNAMENTALES EN HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS. | 52 |

| | |
|---|------------|
| 2.2. MARCO CONCEPTUAL | 56 |
| 2.3. MARCO LEGAL | 58 |
| 2.3.1. RESOLUCIÓN COLOMBIANA 1207 DE 2014 | 59 |
| 2.3.2. AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS EPA Y NORMA OFICIAL MEXICANA. | 62 |
| 2.3.3. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD OMS | 65 |
| 2.3.4. DECRETO 1594 DE 1984 | 66 |
| 2.3.5. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO) | 66 |
| 2.3.6. RESOLUCIÓN 631 DE 2015 | 67 |
| 3. METODOLOGÍA | 68 |
| 4. DISEÑO METODOLÓGICO Y CRONOGRAMA | 69 |
| 4.1. DISEÑO METODOLÓGICO | 69 |
| 4.2. CRONOGRAMA | 72 |
| 5. DIAGNÓSTICO PROCESO DE DISEÑO MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL 2012 Y 2018 | 73 |
| 5.1. DISEÑO MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL 2012 | 73 |
| 5.2. REDISEÑO MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL 2018 | 78 |
| 6. PROCESO DE RESIDEÑO Y CONSTRUCCION DEL HUMEDAL ARTIFICIAL EMPLEADO PLANTAS ORNAMENTALES | 83 |
| 6.1. MATERIALES UTILIZADOS | 83 |
| 6.1.1. PROCESO CONSTRUCTIVO | 90 |
| 6.1.2. CONTROL Y MONITOREO DE AGUA RESIDUAL (CANAL DE CUNDINAMARCA) | 95 |
| 7. RESULTADOS DEL HUMEDAL REDISEÑADO | 97 |
| 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 101 |
| 8.1. COMPARACIÓN MUESTRA 1 Y 2 | 101 |
| 8.1.1. pH | 101 |
| 8.1.2. CONDUCTIVIDAD | 101 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 8.1.3. | RESISTIVIDAD | 102 |
| 8.1.4. | SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TDS) | 103 |
| 8.1.5. | TEMPERATURA | 104 |
| 8.1.6. | TURBIEDAD | 106 |
| 8.1.7. | COLOR | 107 |
| 8.1.8. | DUREZA TOTAL | 107 |
| 8.1.9. | ALCALINIDAD | 108 |
| 8.1.10. | SALINIDAD | 109 |
| 8.1.11. | DBO ₅ | 110 |
| 8.1.12. | DQO | 112 |
| 8.2. | COMPARACIÓN MUESTRA 1 Y 2 CON NORMATIVA VIGENTE | 113 |
| 8.2.1. | pH | 113 |
| 8.2.2. | CONDUCTIVIDAD | 114 |
| 8.2.3. | RESISTIVIDAD | 115 |
| 8.2.4. | SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TDS) | 115 |
| 8.2.5. | TEMPERATURA | 116 |
| 8.2.6. | TURBIEDAD | 117 |
| 8.2.7. | COLOR | 117 |
| 8.2.8. | DUREZA TOTAL | 117 |
| 8.2.9. | ALCALINIDAD | 117 |
| 8.2.1. | DBO ₅ | 118 |
| 8.2.2. | DQO | 120 |
| 8.3. | EFICIENCIA EN REMOCIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL EMPLEANDO PLANTAS ORNAMENTALES | 121 |
| 8.3.1. | PORCENTAJE DE REMOCIÓN EN EL REDISEÑO DEL HUMEDAL AÑO 2019 | 121 |
| 8.3.1. | CUADRO COMPARATIVO RESULTADOS AÑO 2018 Y AÑO 2019 | 124 |
| 9. | CONCLUSIONES | 127 |
| 10. | RECOMENDACIONES | 129 |
| 11. | BIBLIOGRAFÍA | 130 |
| 12. | ANEXOS | 135 |

| | |
|--|-----|
| 12.1. ENSAYOS DE LABORATORIO | 135 |
| 12.2. REGISTRO FOTOGRÁFICO | 141 |
| 12.3. PLANO DE REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL (VER PLANO ANEXO) | 150 |

TABLA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Esquema agua residual | 16 |
| Ilustración 2. Fitorremediación. | 17 |
| Ilustración 3. microhumedales. | 18 |
| Ilustración 4. Humedal natural | 19 |
| Ilustración 5. Planta ornamental Anturio | 20 |
| Ilustración 6. Planta acuática | 20 |
| Ilustración 7. Medio granular humedal artificial | 22 |
| Ilustración 8. Ecuación para determinar el módulo de dispersión | 35 |
| Ilustración 9. Resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno | 37 |
| Ilustración 10. Análisis de Resultados | 37 |
| Ilustración 11. Diseño microhumedales. | 40 |
| Ilustración 12. Muestras de agua residual antes y después del tratamiento con microhumedales artificiales | 41 |
| Ilustración 13. Humedal construido subsuperficial | 43 |
| Ilustración 14. Reactor de humedal artificial utilizando buchón de agua (lado izquierdo) y lenteja de agua (lado derecho). | 47 |
| Ilustración 15. Comportamiento DBO ₅ y DQO en los humedales artificiales. | 49 |
| Ilustración 16. Comportamiento de los sólidos disueltos totales en los humedales artificiales. | 50 |
| Ilustración 17. Comportamiento del PH en humedales artificiales. | 50 |
| Ilustración 18. Heliconia stricta (izquierda). heliconia psittacorum (derecha). | 53 |
| Ilustración 19. Comparación gráfica en remoción de DQO. | 54 |
| Ilustración 20. Comparación gráfica en remoción de DBO ₅ . | 55 |
| Ilustración 21. Humedales | 56 |
| Ilustración 22. Tratamiento de agua residual | 57 |
| Ilustración 23. Modelo con fango o tierra propia de su ecosistema, junco debidamente plantado y confinado. | 74 |
| Ilustración 24. Proceso de recirculación de agua tratada en prototipo humedal artificial 2012 | 77 |
| Ilustración 25. Rediseño Humedal artificial 2018. | 78 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 26. Detalle de rediseño humedal artificial 2018..... | 79 |
| Ilustración 27. Estado humedal artificial año 2018. | 82 |
| Ilustración 28.Fase 1 (fase añadida) rediseño humedal artificial. | 83 |
| Ilustración 29. Fase 2 (existente) rediseño humedal artificial. | 84 |
| Ilustración 30. Tanque rediseño humedal artificial. | 84 |
| Ilustración 31. Planta ornamental empleada. | 85 |
| Ilustración 32. Tubería PVC agua fría. | 85 |
| Ilustración 33.Tubería PVC agua caliente. | 86 |
| Ilustración 34. Malla geotextil. | 86 |
| Ilustración 35. Barreras de grava y antracita. | 87 |
| Ilustración 36. Antracita empleada. | 87 |
| Ilustración 37. Carbón activado en fase 2. | 88 |
| Ilustración 38.Sistema flotador llenado y vaciado tanque y fase 1 | 88 |
| Ilustración 39. Recolección muestra canal de Cundinamarca. | 89 |
| Ilustración 40. Humedal artificial año 2018..... | 90 |
| Ilustración 41.Retiro de juncos en el humedal. | 90 |
| Ilustración 42. Retiro de grava en el humedal. | 91 |
| Ilustración 43. Lavado y desinfección recipiente fase 2. | 91 |
| Ilustración 44.Instalación malla geotextil, tierra, abono y plantas. | 92 |
| Ilustración 45.Montaje fase 2..... | 92 |
| Ilustración 46. Montaje fase 1..... | 93 |
| Ilustración 47. Realización de orificios para Fase 1. | 93 |
| Ilustración 48. Montaje Final..... | 94 |
| Ilustración 49. Muestra 1 canal de Cundinamarca. | 98 |
| Ilustración 50.Muestra 2 canal de Cundinamarca. | 98 |
| Ilustración 51. Laboratorios DBO ₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA..... | 141 |
| Ilustraciones 52. Laboratorios realizados en la universidad. | 142 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Resultados y análisis de laboratorio | 28 |
| Tabla 2. Resultados pruebas de laboratorio prototipo 1..... | 29 |
| Tabla 3. Cálculo de dispersión | 36 |
| Tabla 4. Parámetros de funcionamiento de los 2 microhumedales. | 41 |
| Tabla 5. Algunas especies vegetales nativas tropicales utilizadas en fitorremediación. | 42 |
| Tabla 6. Porcentaje de eliminación promedio para los tres casos..... | 44 |
| Tabla 7. Respuestas fisiológicas de heliconia psittacorum..... | 45 |
| Tabla 8. Dimensiones humedal buchón y lenteja de agua. | 47 |
| Tabla 9. parámetros para el monitoreo..... | 48 |
| Tabla 10. parámetros de calidad de agua del afluente..... | 48 |
| Tabla 11. Altura promedio de las heliconia en los 2 y 7 meses. | 53 |
| Tabla 12. Porcentaje de remoción promedio..... | 53 |
| Tabla 13. Criterios de calidad de agua residual para empleo de riego..... | 60 |
| Tabla 14. Criterios de calidad de agua residual para empleo industrial. | 61 |
| Tabla 15. Criterio de calidad de agua para riego en uso urbano sin restricción . (EPA) | 62 |
| Tabla 16. Criterio de calidad de agua para riego en uso urbano con restricción. (EPA) | 63 |
| Tabla 17. Criterio de calidad de agua para riego en uso agrícola según la agencia de protección ambiental de estados unidos EPA | 64 |
| Tabla 18. Guía de la OMS, para el reúso de aguas negras. | 65 |
| Tabla 19. Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola según el decreto 1594 de 1984..... | 66 |
| Tabla 20. Guías sugeridas para aguas tratadas en el reúso agrícola y sus requerimientos de tratamiento..... | 67 |
| Tabla 21. Valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) de las actividades de servicios..... | 67 |
| Tabla 22. Fases empleadas en la metodología..... | 69 |
| Tabla 23. Cronograma de ensayos | 72 |
| Tabla 24. Tabla dinámica que permite obtener los valores de dimensiones dependiendo de las variables que se tengan para el diseño. | 74 |
| Tabla 25. Resultados de laboratorio prototipo humedal 2012. | 75 |
| Tabla 26. Resultados parámetro DBO ₅ inicial. Humedal artificial 2012. | 76 |
| Tabla 27. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 1 y 2. | 80 |
| Tabla 28. Comparación resultados modelo 2012 (izquierda) vs modelo 2018 (derecha). | 81 |
| Tabla 29. Propuesta Para Realizar Control De Agua En Humedal Artificial | 95 |
| Tabla 30. Resultados Muestra No.1 | 99 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 31. Resultados Muestra No.2 | 100 |
| Tabla 32. Análisis de Resultados Muestra No.1 | 122 |
| Tabla 33. Análisis de Resultados Muestra No.2 | 123 |
| Tabla 34. Cuadro Comparativo Datos de entrada | 124 |
| Tabla 35. Cuadro Comparativo eficiencia 5 días prototipo 2018 y 2019. | 125 |
| Tabla 36. Cuadro Comparativo eficiencia 21 días muestra 1 vs prototipo 1 y 2. | 126 |
| Tabla 37. Ensayos DBO ₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA Entrada al humedal muestra 1 | 135 |
| Tabla 38. Ensayos DBO ₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA a los 21 días..... | 136 |
| Tabla 39. Ensayos DBO ₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA Entrada al humedal muestra 2 | 137 |
| Tabla 40. Ensayos DBO ₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA a los 21 días..... | 138 |
| Tabla 41. Ensayos de laboratorio realizados en la universidad católica de Colombia - muestra 1 | 139 |
| Tabla 42. Ensayos de laboratorio realizados en la universidad católica de Colombia- muestra 2 | 140 |

LISTA DE GRAFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1.Resultados pH muestras 1 y 2. | 101 |
| Gráfico 2. Resultados conductividad muestras 1 y 2..... | 102 |
| Gráfico 3.Resultados resistividad muestras 1 y 2..... | 103 |
| Gráfico 4.Resultados sólidos suspendidos totales muestras 1 y 2. | 104 |
| Gráfico 5. Resultados temperatura muestras 1 y 2. | 105 |
| Gráfico 6. Resultados temperatura muestras 1 y 2. | 106 |
| Gráfico 7. Resultados color muestras 1 y 2..... | 107 |
| Gráfico 8. Resultados dureza total muestras 1 y 2..... | 108 |
| Gráfico 9. Resultados alcalinidad muestras 1 y 2..... | 109 |
| Gráfico 10. Resultados salinidad muestras 1 y 2. | 110 |
| Gráfico 11. Resultados DBO5 muestras 1 y 2..... | 111 |
| Gráfico 12. Resultados DQO muestras 1 y 2. | 112 |
| Gráfico 13. Comparación pH con Resolución 1207 y EPA..... | 113 |
| Gráfico 14. Comparación pH con Decreto 1594 de 1984..... | 114 |
| Gráfico 15. Comparación Conductividad con Resolución 1207..... | 114 |
| Gráfico 16. Comparación TDS con normativa EPA 2004. | 115 |
| Gráfico 17. Comparación temperatura con norma Oficial Mexicana. | 116 |
| Gráfico 18. Comparación Turbiedad con la EPA para reúso urbano..... | 117 |
| Gráfico 19. Comparación DBO ₅ con EPA 2000 para reúso agrícola. | 118 |
| Gráfico 20. Comparación DBO5 para reúso urbano Norma oficial mexicana y EPA.... | 119 |
| Gráfico 21.Comparación DQO con parámetro exigido por la resolución 631 de 2015 para servicios y otras actividades..... | 120 |

GLOSARIO

Para el desarrollo del proyecto se presentan los términos fundamentales de la investigación.

Aguas residuales: las aguas residuales se pueden definir como aquellas que, por uso del hombre, representan un peligro y deben ser tratadas, ya que contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos. Dentro de este concepto se incluyen aguas con diversos orígenes:

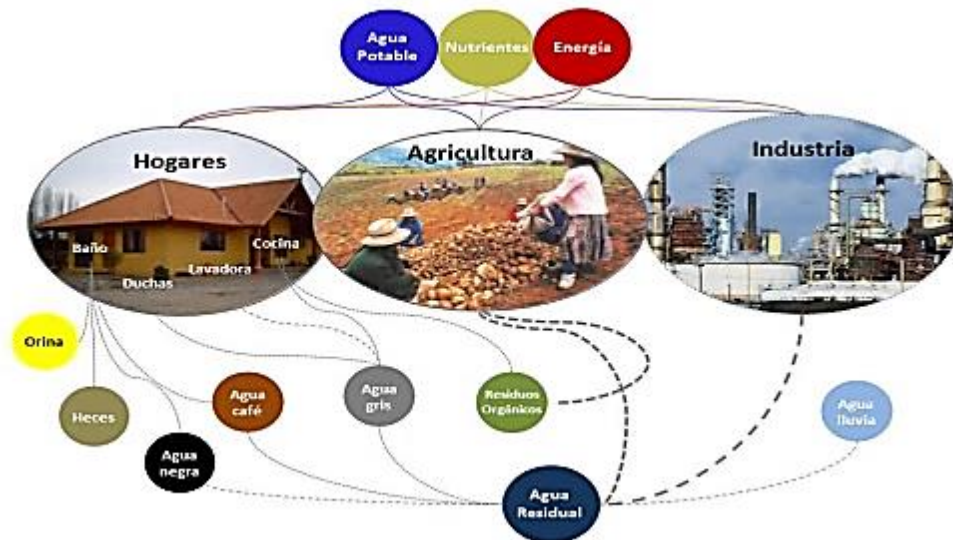
-Aguas residuales domésticas o aguas negras: proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas.

- Aguas blancas: pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, éstas pueden de evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración (García, Pérez, & Generalidades, 2019).

Aguas residuales industriales: proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales.

- Aguas residuales agrícolas: procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, de las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo (García et al., 2019).

Ilustración 1. Esquema agua residual



Fuente: (SSWM Sustainable sanitation and water management., 2019).

En la **Ilustración 1** se muestran los diferentes medios de donde provienen las aguas residuales.

Coliformes: son un grupo de microorganismos que se encuentran comúnmente en el suelo agua sobre la superficie y en las plantas, están presentes en los intestinos de animales y humanos, las bacterias coliformes que la lluvia arrastra por el suelo usualmente quedan atrapadas en las rocas y a medida que el agua pasa por las rocas llega a los sistemas de agua subterránea, sin embargo, los pozos que no están bien construidos que están rajados pueden proveer una puerta para que las bacterias coliformes entren al agua y contaminan el agua que se bebe (División de salud pública de Carolina del Norte., 2009).

Carbón activo: El carbón activado puede atrapar diferentes productos químicos por medio de una propiedad conocida como adsorción. Cuando un líquido o gas entran en contacto con el carbón activado, éste atrae y retiene uno o más átomos, moléculas o iones en su superficie.

El carbón activado es ampliamente utilizado en el tratamiento de agua potable, ya sea en un lecho o como filtro. Puede eliminar una amplia gama de compuestos, incluyendo al cloro y a los taninos. En el tratamiento de efluentes, el carbón activado

desempeña un papel importante en los procesos de tratamiento terciario, donde se lo utiliza para eliminar sustancias orgánicas y algunas inorgánicas (Fluence, 2016).

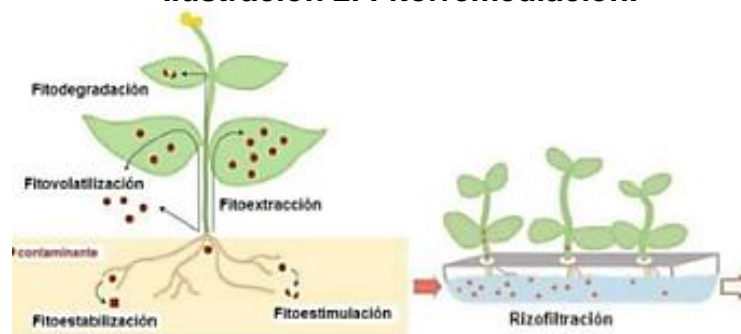
DBO: la demanda bioquímica de oxígeno es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y residuales; su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. Los datos de la prueba de la DBO se utilizan en ingeniería para diseñar las plantas de tratamiento de aguas residuales (Laboratorio de química ambiental., 1997).

DQO: la Demanda Química de Oxígeno, determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (IDEAM, 2007).

Filtros: un filtro de agua es un aparato compuesto generalmente de un material poroso y carbón activo, que permite purificar este líquido que viene directamente del acueducto y llega a través de los grifos. Al pasar por el filtro, este atrapa las partículas que el agua trae y pueden ser tóxicas o perjudiciales para la salud. Algunos de estos elementos son arena, barro, oxido, polvo, hierro, altas cantidades de cloro y bacterias, entre otros (Banrepcultural, 2017).

Fitorremediación: la fitorremediación se refiere básicamente al uso de plantas y microbios del suelo asociados para reducir las concentraciones o los efectos tóxicos de los contaminantes en el medio ambiente. La fitorremediación es ampliamente aceptada como una tecnología de restauración ambiental rentable (Sigurdur Greipsson (Department of Biology & Physics, 2011).

Ilustración 2. Fitorremediación.



Fuente: (De Farmacia & Sanz, 2015).

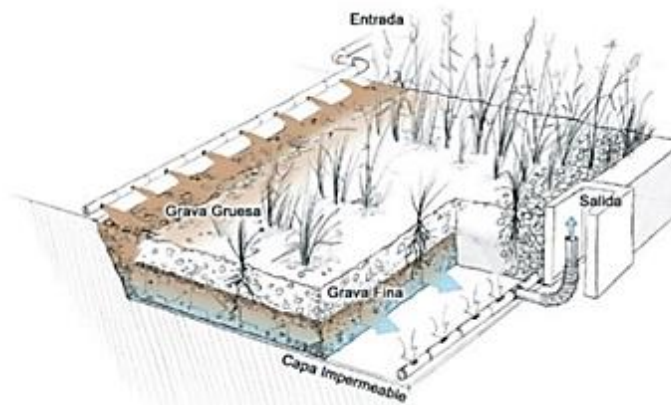
En la **Ilustración 2** se evidencia las técnicas de la fitorremediación, las cuales son fitodegradación, fitovolatilización, fitoextracción, fitoestabilización, fitoestimulación y rizofiltración.

Geotextil: los geotextiles son membranas permeables sintéticas, resistentes a la tensión y al punzonamiento que actúan como elementos de refuerzo, separación, filtro y drenaje en los diferentes tipos de construcciones («Geotextiles», 2012).

Grava: se denomina grava a las rocas sedimentarias detríticas producto de la división natural o artificial de otras rocas y minerales. Los fragmentos de la grava miden entre 2 y 64 milímetros de diámetro y su composición química es variada; Está constituida principalmente por rocas ricas en cuarzo y cuarcita, también por clastos de caliza, basalto, granito y dolomita («Grava | Qué es, usos, características, diferenciación, obtención | Triturada, redondeada», 2016).

Humedal artificial: los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos, el carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por: el confinamiento del humedal, el cual se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar pérdidas de agua al subsuelo, el empleo de sustratos diferentes del terreno original para el enraizamiento de las plantas y la selección de las plantas que van a colonizar el humedal (. (Martínez, 2013).

Ilustración 3. microhumedales.



Fuente:(Martínez, 2013).

Ilustración 3 se observa los materiales utilizados en el humedal artificial, en su funcionamiento tiene una entrada por un tubo donde por medio de unos orificios el agua sale al humedal, esta agua pasa por cada una de las capas del suelo del humedal y por las raíces de las plantas, después de realizar el recorrido llega a la salida.

Humedal natural: los humedales son zonas de transición entre los ecosistemas terrestres y los ecosistemas acuáticos y poseen una baja profundidad, de acuerdo con el Centro Regional Ramsar para el hemisferio occidental (CREHO). Suelen encontrarse en llanuras inundadas muy próximas a los cursos de agua como los ríos o lagos que les proveen el líquido. No obstante, algunos humedales pueden parecer aislados, sin ningún cuerpo de agua cercano, pero en estos casos están conectados con aguas subterráneas, así que el agua de los humedales puede ser subterránea, cercana a la superficie del terreno o de escasa profundidad (GeoEnciclopedia, 2019).

Ilustración 4. Humedal natural



Fuente: (Fundación humedales de Bogotá, 2019)

Ilustración 4 se evidencia el humedal natural La Conejera ubicado en la localidad de suba en Bogotá

Metales pesados: los metales pesados están presentes naturalmente en la corteza terrestre y en las rocas en forma de sulfuros y minerales de óxido. Estos pueden extraerse como minerales de diversos minerales como los sulfuros de plomo, hierro, mercurio, cadmio, arsénico o cobalto. La lixiviación de metales pesados en lagos, ríos y océanos, debido a la erosión de las rocas y las erupciones volcánicas y los procesos mineros, puede causar una grave contaminación al afectar las áreas circundantes a través de las lluvias ácidas (ScienceDirect, 2019).

Microorganismo: los organismos microscópicos, comúnmente conocidos como microorganismos o microbios, se encuentran a nuestro alrededor e incluso dentro de

nuestros cuerpos. La categoría "Microbios" incluye una amplia gama de organismos que incluyen bacterias, hongos, virus, algas, arqueas y protozoos. Algunos de estos, como las bacterias y los hongos, son bien conocidos, pero otros, como las arqueas, mucho menos (BioCOte, 2014).

Plantas ornamentales: las plantas ornamentales son a menudo puntos focales en el paisaje. Usted puede encontrar plantas ornamentales en una variedad de cultivares, desde rosas a pastos y de hoja caduca a hoja perenne. Algunas plantas ornamentales que florecen atraen colibríes y mariposas, mientras que otras simplemente agregan color durante todo el año (Hunker, 2019).

Ilustración 5. Planta ornamental Anturio



Fuente: (De jardín Revista Colombiana de jardinería, 2018).

En la **Ilustración 5** se evidencian las partes de la planta ornamental de la familia de los anturios.

Planta subacuática: las plantas acuáticas de los humedales cumplen un importante papel para el ecosistema, colaboran con la producción primaria, regulación de la calidad del agua, aportan detritus al sistema, absorben y liberan nutrientes, compiten entre ellas mismas, facilitan la diversificación de hábitats y alimento faunístico (Jorge Manuel Escobar Moreno, 2012).

Ilustración 6. Planta acuática



Fuente: (Fundación humdales de Bogotá, 2019)

En la **Ilustración 6** se evidencia la planta acuática buchón de agua.

Reúso: el reúso de agua residual es un proceso mediante el cual, este tipo de agua que proviene como productos de haber sido utilizada en cualquier tipo de actividades, sean domésticas, industriales o de otro tipo, sufre o no sufre un proceso de tratamiento y nuevamente es utilizada para la misma actividad (Uribía Suarez 2012).

La EPA define el reúso como la reutilización del efluente y el agua recuperada desde una aplicación a otra (irrigación, recarga de acuíferos, uso industrial, líneas de incendio, etc.). El reúso de agua residual es el aprovechamiento del agua previamente utilizada, una o más veces en alguna actividad para suplir las necesidades de otros usos (RALCEA, 2013).

Sedimento: el sedimento es un material sólido que se mueve y se deposita en una nueva ubicación. Los sedimentos pueden consistir en rocas y minerales, así como los restos de plantas y animales. Puede ser tan pequeño como un grano de arena o tan grande como una roca (National Geographic society, 2019).

Sustrato medio granular: en los humedales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico.

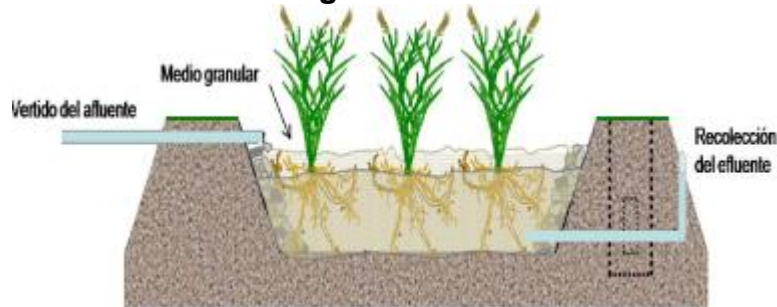
La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos.

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.

- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes (Delgadillo et al. 2010).

Ilustración 7. Medio granular humedal artificial



Fuente: (bidatek, 2017).

En la **Ilustración 7** se presenta el esquema de cómo va distribuido el sustrato medio granular en un humedal artificial.

Tratamiento de aguas residuales: el tratamiento de aguas residuales, o tratamiento de aguas residuales domésticas, es el proceso de eliminación de contaminantes de las aguas residuales y las aguas residuales domésticas, tanto de esorrentía (efluentes) como domésticas. Incluye procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos (New World Encyclopedia., 2015).

RESUMEN

El agua ha sido reconocida como un asunto estratégico y de seguridad nacional, y se ha convertido en elemento central de las actuales políticas ambientales y económicas, así como un factor clave del desarrollo social. Lograr que todos los cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país recuperen su salud, aporten caudales para satisfacer las necesidades de la población y contribuyan al crecimiento económico y calidad de vida de la población; requiere que se mantengan limpios, sin descargas de aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas que los contaminen y afecten más allá de su capacidad natural de asimilación y dilución (Eugenia de la Peña Jorge Ducci Viridiana Zamora, 2013).

El agua residual que es generado por las viviendas y el uso comercial, entre otras evidencian la existencia de altos niveles de contaminación, ya que al momento de ser utilizadas generan “sólidos suspendidos, coliformes fecales, materia orgánica, metales pesados y otros contribuyentes como aceites, grasas e hidrocarburos (Peña & Guzmán, 2012). Al momento en que las aguas residuales hacen contacto con las fuentes hídricas generan una disminución en la calidad del agua, ya que se contamina los cuerpos de agua existentes, para tratar de disminuir la contaminación que generan las aguas residuales a nivel mundial se desarrollaron tecnología para el tratamiento de esas aguas y que estas sean utilizadas para satisfacer necesidades, ocasionando un menor impacto al medio ambiente.

En el semillero de Investigación Eco Civil durante los últimos años se ha llevado a cabo las investigaciones, para el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas que se puedan reutilizar con el fin de mitigar el impacto ambiental, y dando un nuevo uso al agua.

En este trabajo de investigación se presentan los resultados obtenidos del rediseño de un prototipo de humedal artificial, que sirve como modelo didáctico para el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia, este tiene como propósito la depuración de aguas residuales empleando la planta ornamental Anturio blanco, y la planta acuática Junco común (la cual ya se encontraba en el sistema). Se desarrolla una mejora en el proceso de recirculación, empleando tubería de 1/2” de PVC, con el fin de evitar la obstaculización del laboratorio con el balde que se encontraba.

Se adicionó un recipiente denominado Fase 1, con los siguientes materiales:

- ✓ Grava.
- ✓ Antracita.
- ✓ Planta Anturio blanco.
- ✓ Planta Junco común.
- ✓ Geotextil.

Se instaló otro recipiente después de la fase existente, este contiene la bomba pecera y un sistema que controla el momento en que la bomba se prende o apaga de acuerdo con el nivel del agua.

En el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia se midieron los parámetros de conductividad, pH, sólidos disueltos totales, salinidad, turbiedad, resistividad, temperatura, alcalinidad, color, dureza total, dureza cálcica y dureza magnésica. Se recurrió a la compañía ALLCHEM LTDA para la realización de los ensayos de DBO₅ y DQO.

El rediseño del humedal tuvo resultados satisfactorios, el empleo de la planta ornamental demostró eficiencia en la remoción de los parámetros contaminantes presentes en el agua los cuales fueron conductividad, sólidos suspendidos, turbiedad, color DBO₅ y DQO, a su vez se demostró que la planta ornamental Anturio blanco es apta para emplearse en la depuración de aguas residuales.

Se puede concluir que este rediseño fue eficiente porque al realizar la comparación con los resultados de remoción obtenidos del rediseño del año 2018, se superó en gran medida los porcentajes de remoción alcanzados, teniendo en cuenta que para esta vez se empleó agua residual mucho más contaminada con mayores unidades de color, conductividad, resistividad, sólidos suspendidos, turbiedad y alcalinidad.

INTRODUCCIÓN

El aumento en la generación de aguas residuales y la alta contaminación del planeta ha obligado a la ingeniería, a encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de depuración eficientes en el tratamiento de aguas residuales, que son autónomas y económicamente viables. Una de las soluciones que se emplea actualmente es la construcción de humedales artificiales, sistemas que se realizan con bajos costos de inversión, operación y mantenimiento; además de que no requieren personal altamente calificado para su cuidado. Son sistemas efectivos en la reducción de materia orgánica, presente en aguas contaminadas, reteniendo y eliminando sustancias tóxicas, generando un impacto positivo al medio ambiente, para dar un nuevo uso a las aguas tratadas.

Este documento contiene el desarrollo del trabajo de grado para optar al título de ingenieras civiles, donde se verificó la eficiencia que existe entre las plantas subacuáticas y ornamentales en la purificación de aguas residuales, utilizando el prototipo de humedal artificial existente en el laboratorio de plantas de tratamiento de agua de la Universidad Católica de Colombia, se efectuó una mejora en el rediseño realizado por estudiantes del semillero Eco civil en el año 2018.

Mediante este rediseño se quiere alcanzar mejores resultados en el proceso de depuración de agua residual adicionando una fase más al proceso de tratamiento e implementando plantas ornamentales para mejorar su funcionamiento en el tratamiento de aguas residuales con altos nivel de contaminación. Inicialmente se realizó una verificación del funcionamiento en el que se encontraba el prototipo existente, se propuso tener 2 fases y un tanque. En cada una de estas fases, el prototipo contó con los siguientes materiales (grava, carbón activo, antracita, plantas ornamentales, geotextil para filtros). En el tanque se suministra el agua a sistema.

Se mejoró el sistema de recirculación con tubería de $\frac{1}{2}$ " de PVC, se instaló malla geotextil a la salida de cada fase para evitar taponamientos en el sistema. Se instaló un circuito que permite que la bomba se prenda o apague de acuerdo al nivel del agua, se realizaron los ensayos de laboratorio para cada una de las fases y se observaron los cambios que tiene el agua de una fase a la otra.

Este documento consta de 11 capítulos, que está estructurado así: 1. Generalidades (Antecedentes y justificación, Planteamiento y formulación del problema, Objetivos, alcances y limitaciones. 2. Marco referencial (Marco teórico, Marco conceptual, Marco legal). 3. Metodología (Se presentan las fases correspondientes para la elaboración del



rediseño del prototipo de humedal artificial para la depuración de aguas residuales con plantas ornamentales). 4. Diseño metodológico y cronograma (Presenta tabla del proceso que se realizó para cumplir cada objetivo y el cronograma de los ensayos realizados). 5. Diagnostico proceso de diseño del humedal artificial en el año 2012 y 2018. 6. Proceso de rediseño y construcción del humedal artificial empleado plantas ornamentales. 7. Resultados Del Humedal Rediseñado. 8. Análisis de resultados 9. Conclusiones. 10. Recomendaciones. 11. Bibliografía. 12. Anexos (planos en AutoCAD, Ensayos de Laboratorio y registro fotográfico).

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos.

El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por: el confinamiento del humedal, el cual se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar pérdidas de agua al subsuelo; el empleo de sustratos diferentes del terreno original para el enraizamiento de las plantas y la selección de las plantas que van a colonizar el humedal.

Sin embargo, se puede decir que fue el trabajo del Doctor Kickuth en las décadas de los 70 y los 80 el que realmente estimuló el interés en la tecnología de Humedales Artificiales en Europa. Estos estudios se basaban en los procesos de tratamiento del agua que ocurren en la zona de la raíz del carrizo común (*Phragmites australis*) y en el suelo en el que las plantas crecen.

Durante los años 70 y 80 la principal utilización de los humedales artificiales fue como estaciones de depuración de aguas residuales urbanas. Pero es a partir de la década de los 90 cuando los humedales artificiales, además de los usos mencionados, se han utilizado con éxito en el tratamiento de distintas aguas residuales industriales (AGUASRESIDUALES.INFO, 2015).

La idea del diseño del prototipo de humedal artificial, surgió en el año 2012 por los estudiantes Mauricio Charry Agudelo y Nelson Fabian Achipiz del semillero de investigación EcoCivil de la Universidad Católica de Colombia, ellos realizaron el montaje, cálculos y ensayos de laboratorio para determinar los parámetros de remoción de los agentes contaminantes en el humedal artificial, para el diseño del modelo utilizaron el método de vaciado llenado, emplearon la planta junco para la remoción, hicieron el diseño para el lecho filtrante y midieron las siguientes pruebas de laboratorio:

Tabla 1. Resultados y análisis de laboratorio

| RESULTADOS DE PRUEBAS Y ANALISIS DE LABORATORIO | | | |
|---|-------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| NOMBRE DE LA PRUEBA | MUESTRA CONDICIONES INICIALES | MUESTRA TRATADA | MUESTRA TRATADA CON RECIRCULACION |
| PH | 7,3 | 5,7 | 4,6 |
| CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{s/cm}$) | 72,4 | 340 | 340 |
| RESISTIBILIDAD ($\text{K}\Omega/\text{cm}$) | 13,77 | 2,9 | 2,9 |
| SOLIDOS EN SUSPENSION (mg/l) | 38,7 | 181 | 181 |
| SALINIDAD | 0 | 0,2 | 0,2 |
| TEMPERATURA $^{\circ}\text{C}$ | 17,1 | 15,8 | 15,8 |
| OXIGENO (mg/l) | 0,77 | 0,78 | 0,78 |
| PORCENTAJE DE OXIGENO (%) | 10,8 | 10,7 | 10,6 |
| TURBIEDAD (NTU) | 31,2 | 2,64 | 16,4 |
| COLOR APARENTE (Unid. De PtCo) | 338 | 25 | 107 |
| DUREZA (mg/l CaCO_3) | 3,08 | 3,08 | 2,95 |
| ALCALINIDAD (mg/l CaCO_3) | 32 | 37 | 27 |
| DBO ₅ | 32,7 | 2,65 | NO APLICA |
| | | | |

Fuente: (Charry & Achipiz, 2012).

De acuerdo con los resultados de laboratorio de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, obtuvieron una evidente reducción de la carga contaminante DBO₅ en el agua residual.

Posteriormente en el año 2018, dos estudiantes del mismo semillero, María Morales y Leidy Castellanos realizaron un rediseño al humedal, sembraron la planta subacuática junco y usaron antracita como medio filtrante para la depuración de agua. Instalaron un proceso de recirculación, para evitar que el agua se estancara y fuera fuente de mosquitos y mal olor, para este proceso emplearon una bomba de pecera. Los parámetros que midieron en el agua residual del Rio Arzobispo fueron los siguientes:

Tabla 2. Resultados pruebas de laboratorio prototipo 1.

| Parámetro | Unidades | Lab. 1 Entrada | Lab. 2 5 días | Lab. 3 21 días |
|---------------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| pH | Adimensional | 7,55 | 7,73 | 6,93 |
| Conductividad: | μs/cm | 285,00 | 228,00 | 180,40 |
| Resistividad | kΩ/cm | 3,50 | 4,39 | 5,46 |
| Turbiedad | NTU | 26,00 | 2,00 | 4,00 |
| Color | PtCo | 273,00 | 29,00 | 27,00 |
| Salinidad | Sal | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| %O | % | 0,00 | 10,00 | 0,00 |
| O | mg/l | 0,60 | 0,70 | 0,00 |
| Solidos Suspendidos | mg/l | 152,00 | 121,00 | 98,40 |
| Temperatura | °C | 17,00 | 19,50 | 17,20 |
| Alcalinidad | CaCO ₃ /l | 75,00 | 39,00 | 38,00 |

Fuente:(María y Castellanos 2018).

Como se muestra en la **Tabla 2** se midieron los parámetros a los 5 y 21 días, se analizó cada parámetro y determinaron que el proceso de recirculación con bomba en el humedal garantizó eficiencia respecto a los parámetros de calidad de agua y también se evitó malos olores en el sistema.

El problema que se presenta actualmente en el funcionamiento del humedal es que una vez la persona encargada de cuidar el humedal toma sus vacaciones, el humedal se seca, causando que el junco se marchite y pueda morir, La solución que se propone es mejorar el sistema de funcionamiento del humedal, es que se regule automáticamente en el momento que no presente agua.

Se realizó el diseño de una fase adicional al proceso de tratamiento de aguas existente, con el fin de optimizar los resultados del análisis de calidad de agua. Esta irá antes de la fase actual, con el fin de comparar la calidad del agua cuando pasa de la fase 1 a la 2(fase actual), donde se analizará la calidad del agua en cada una de las fases. A su vez se sembró planta ornamental Anturio blanco, para comparar la eficiencia de esta con la planta subacuática junco, empleada en el semestre anterior.

Se realizó el rediseño generando un sistema no convencional como lo son los humedales artificiales, donde los estudiantes y docentes de la universidad podrán interactuar en el laboratorio ya que es un modelo didáctico donde se puede evidenciar el comportamiento que se da en estos sistemas naturales para la depuración de agua con el cuál se puede determinar las ventajas que prevalecen sobre los sistemas convencionales. Al igual estos modelos, pueden ser implementados a escala real en edificaciones y dado, que se usan plantas ornamentales lograría mejorar el paisaje urbanístico. Además de generar

beneficios para el tratamiento de las aguas residuales y mitigar el impacto ambiental que estas aguas contaminadas generan en los cuerpos hídricos y en el medio ambiente.

1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Descripción del problema

En el año 2012 en la Universidad Católica de Colombia se realizó el diseño y la construcción de un prototipo de humedal artificial por estudiantes que hacían parte del semillero Eco Civil, y a su vez en el año 2018 estudiantes del mismo semillero realizaron un rediseño empleando plantas subacuáticas y generando un sistema de circulación para este, optimizando el sistema de riego y limpieza del humedal.

Se ve la insuficiencia en el bombeo al realizar la recirculación, por tal razón se propone que se modifique la operación del humedal a que sea mecánico y automático, ya que durante los tiempos en que el laboratorista de la universidad toma las vacaciones, el agua se evapora causando que el humedal no pueda seguir funcionando de manera adecuada, generando que el agua no obtenga el tratamiento adecuado y no se pueda utilizar para el fin con el que se realizó, se evidencia en el sistema actual, taponamiento de las mangueras que conducen el agua, debido a la cantidad de sedimentos que tiene el humedal artificial.

Se ve la necesidad de tratar aguas residuales con más altos niveles contaminación con el fin de mitigar, el impacto ambiental que estas aguas generan al medio ambiente y a los cuerpos de agua y así mismo poder determinar un reúso.

1.2.2. Formulación del problema.

Como se expresó en la descripción del problema, se realizaron mejoras en la calidad del humedal para tratar agua residual con altos niveles de contaminación, para ello se determinó instalar una fase adicional al sistema, la cual se denomina **fase 1**, **la fase 2** es la ya existente, que tiene actualmente sembrados juncos. Para mejorar la calidad de agua del sistema, se instalaron plantas ornamentales en cada una de las fases.

Se realiza una comparación de la calidad de agua que se obtuvo en la fase 1 y 2 con plantas ornamentales, frente a los resultados del sistema con plantas subacuáticas.

A su vez se realizó el diseño de recirculación automático, empleando un flotador que permita el llenado y vaciado del tanque, que abastecerá de agua al humedal en el momento en que el agua se evapore.

Para mejorar el sistema de conducción de agua que tiene actualmente el humedal, se instaló geotextil para impedir el paso de sedimentos por las mangueras causando taponamiento en el sistema.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Realizar el rediseño del prototipo de humedal artificial (laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia), que permita analizar la eficiencia en el tratamiento del agua residual, implementando una fase más al proceso de tratamiento de aguas existente, con el fin de optimizar los resultados del análisis de calidad de agua, esta irá antes de la fase actual, con el fin de comparar la calidad del agua cuando pasa de la fase 1 a la 2, utilizando plantas ornamentales.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar la valoración del estado actual del humedal artificial que se encuentra en el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia.

- Hacer el rediseño del humedal y construirlo bajo los parámetros propuestos, teniendo en cuenta la inclusión de plantas ornamentales y seleccionando aguas residuales con altos niveles de contaminación¹.
- Determinar los parámetros de calidad de agua empleando la planta ornamental escogida y compararlos con los resultados obtenidos de una planta subacuática que fue usada en el prototipo realizado en el año 2018.

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.4.1. Alcances

El presente proyecto de investigación tiene como fin desarrollar el rediseño del prototipo del humedal artificial que existe en la Universidad Católica de Colombia, en el laboratorio de plantas de tratamiento de agua, el cual fue construido por estudiantes del semillero Eco Civil en el año 2012 y rediseñado en el año 2018, donde se generó la depuración de agua y recirculación del sistema de tratamiento. En este proyecto se generará el proceso de depuración de aguas del canal de Cundinamarca, el cual se encuentra a la fecha altamente contaminado.

Se realiza el diseño de una fase más al proceso de tratamiento de aguas existente, con el fin de optimizar los resultados del análisis de calidad de agua, esta irá antes de la fase actual, con el fin de comparar la calidad del agua cuando pasa de la fase 1 a la 2. Para mejorar el sistema de circulación que tiene actualmente el humedal, se instala geotextil para impedir el paso de sedimentos por las mangueras, mejorando el sistema de filtración y de recirculación para que sea sostenible.

El rediseño del prototipo se elabora en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia, al agua residual se le realiza los ensayos correspondientes para verificar el porcentaje de eficiencia y poder comparar con el porcentaje del año 2018. Así mismo, poder dar la mejor alternativa de aplicación al usar las plantas ornamentales o subacuáticas.

¹ Aguas Residuales, sedimentos, residuos orgánicos, botellas plásticas, sillones viejos, escombros, desperdicios orgánicos procedentes de una plaza de mercado y todo tipo de residuos sólidos que provienen de otros canales. (Acueducto de Bogotá, 2011).

De acuerdo con los resultados obtenidos se revisan los parámetros de la norma 1207 de 2014 de acuerdo con la normatividad y calidad se destina el uso de las aguas tratadas.

1.4.2. Limitaciones

Para la solicitud de prácticas libres en los laboratorios de la Universidad en donde se llevó a cabo tanto los ensayos de laboratorios, como el rediseño del prototipo, se pueden superar los ocho días de respuesta. Esto genera atrasos en la elaboración del rediseño y toma de muestras, por lo que se considera un factor limitante para el proyecto efectuado, al igual que el hecho de que en la universidad no se encuentran los equipos necesarios para monitorear coliformes, DBO₅, DQO, nitrógeno total y fósforo total, que son parámetros estipulados en la normatividad colombiana para determinar la calidad del agua.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO TEÓRICO

La importancia y trascendencia de los humedales artificiales, radica fundamentalmente en que son una alternativa viable y sustentable para la depuración de aguas residuales de tipo industrial, agropecuaria y doméstica (Luna-Pabello & Aburto-Castañeda, 2014).

El uso de humedales artificiales tiene un menor costo en comparación con los sistemas de tratamiento de agua residual actuales como lo son las plantas de tratamiento, además la depuración de agua con humedales artificiales elimina rápidamente el olor y color de las aguas residuales ofreciendo una vista agradable al entorno.

De acuerdo con el tema a tratar se realizó una serie de investigaciones de artículos y tesis realizadas en diferentes partes del país, con el fin de conocer el tema de los humedales artificiales, donde podemos determinar su importancia y funcionamiento.

2.1.1. Construcción De Un Humedal Artificial A Nivel De Laboratorio Vivo, En El Predio “Mi Ranchito”, En La Vereda Olarte, Localidad Usme – Bogotá

Esta trabajo de investigación fue realizado por Leidy Carolina Gómez Ramirez y Jeyson Gonzalo Garcia Echavarria en Bogotá en el año 2018, donde el proyecto tiene como finalidad dar el adecuado tratamiento a las aguas residuales que se producen en la finca mi ranchito, ya que no cuenta con un sistema de alcantarillado, y la entidad CAR le exige al propietario de la finca contar con los parámetros mínimos exigidos por la norma para verter el agua, ya que esta agua está ocasionando una contaminación en el cuerpo de agua, para dar una solución al problema antes mencionado se realiza un humedal artificial de superficie libre de flujo horizontal y que se diseñó con el parámetro establecido por la Agencia de protección de estados unidos (EPA), donde se verifican las características del terreno, cumpliendo en todo.

Para la construcción del humedal realizaron el replanteo respectivo para poder ubicar las tuberías y las cajas de inspección, utilizaron una vegetación llamada papiro la cual las raíces deben ir a 10 cm por debajo de la superficie del estrato, se utilizó un filtro de una capa de grava, una capa de arena y geotextil.

Luego se realiza una modelación matemática con el fin de determinar si se presenta flujo pistón o mezcla completa de los humedales artificiales, donde utilizan la siguiente ecuación que les permite calcular módulo de dispersión.



Ilustración 8. Ecuación para determinar el módulo de dispersión

$$\frac{D}{vL} = \alpha * \frac{u}{u^*} * \frac{W^2}{Lh}$$

Donde:

- ❖ D/vL es el módulo de dispersión.
- ❖ α es una constante que depende de la forma de la sección transversal. Para efectos de cálculo se toma $\alpha=1$.
- ❖ u es la velocidad media del flujo en el humedal artificial (m/d).
- ❖ u^* es la velocidad cortante o dinámica.
- ❖ W es el ancho del humedal artificial.
- ❖ L es la longitud del humedal artificial.
- ❖ h es la profundidad del humedal artificial.

Fuente: (Leidy Carolina Gómez Ramirez Jeyson Gonzalo García Echavarría, 2018).

Remplazando los datos en la ecuación **Ilustración 8** se obtienen los siguientes datos de la **Tabla 3** donde se evidencia que el valor del módulo de dispersión, es muy pequeño y tiende a cero, por lo tanto, se considera una dispersión despreciable.

Tabla 3. Cálculo de dispersión

| CÁLCULO DEL MÓDULO DE DISPERSIÓN | |
|--|-----------|
| Variable | Valor |
| Q= Caudal de Diseño (m^3/s) | 6,94E-06 |
| f= Coeficiente de fricción (\sim) | 4,00E-02 |
| D= Diámetro (m) | 0,1016 |
| μ = Viscosidad Dinámica ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) | 0,001139 |
| d= Densidad (Kg/m^3) | 999,1 |
| Re= Número de Reynolds (\sim) | 1,60E+03 |
| V=u= Velocidad Media del Flujo (m/s) | 4,63E-06 |
| $v=u^*$ = Velocidad Cortante (m/s) | 0,02 |
| α (\sim) | 1 |
| u= Velocidad Media del Flujo (m/d) | 0,4 |
| u^* = Velocidad Cortante (m/d) | 1551,1535 |
| W= Ancho del Humedal (m) | 1 |
| L= Longitud del Humedal (m) | 2 |
| h= Profundidad del Humedal (m) | 0,75 |
| D/vL= Módulo de Dispersión (\sim) | 0,0001719 |

Fuente: (Leidy Carolina Gómez Ramirez Jeyson Gonzalo García Echavarría, 2018).

“La condición ideal en un humedal artificial es que el flujo sea pistón, por lo que el fluido que entra al sistema, lo hace de forma continua sin que se mezcle con cualquier otro elemento durante su recorrido por el humedal artificial” (Leidy Carolina Gómez Ramirez Jeyson Gonzalo García Echavarría, 2018).

Se realizó modelación mediante el software modelmuse (MODFLOW) para simular el humedal que se construyó en mi ranchito donde se puede verificar la remoción que el humedal realiza y al final comparar los resultados obtenidos con el modelamiento realizado con el programa y los resultados obtenidos del humedal vivo.

Se realizó el monitorio al humedal artificial durante 4 meses para determinar el porcentaje de remoción de materia orgánica y que cumpla con los parámetros exigidos por la norma para verter agua en cuerpos hídricos.

Para determinar si el humedal es óptimo se realiza los ensayos de laboratorio de demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) aguas arriba y aguas abajo del humedal artificial y poder compararlos al Inicio y a la salida del humedal.



Ilustración 9. Resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno

| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DBO ₅ (mgO ₂ /L) | | |
|--|---------------------|--------------------|
| Fecha | Entrada del Humedal | Salida del Humedal |
| 27/10/2017 | 1049* | - |
| 6/04/2018 | 1884 | 440 |

Fuente: (Leidy Carolina Gómez Ramirez Jeyson Gonzalo García Echavarría, 2018).

En la **Ilustración 9** se puede evidenciar que los resultados disminuyen de acuerdo con los valores iniciales, en la

Ilustración 10. Análisis de RESULTADOS se remplaza la ecuación y se determina que el porcentaje de remoción es del 77% y que los resultados obtenidos cumplen con la normatividad vigente.

En la resolución 0330 del 8 de junio del 2017, en la sección 4 de tratamientos centralizados - Artículo 184, el porcentaje de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) para un sistema de tratamiento secundario debe estar entre el 80% y 90%⁵⁷, lo cual indica que el resultado del 77% de remoción en la concentración (DBO₅) del HA se acerca a la eficiencia necesaria para los procesos de tratamiento de Agua Residual.

Ilustración 10. Análisis de Resultados

$$\% \text{ Remoción} = \left(\frac{\text{Entrada DBO}_5 - \text{salida DBO}_5}{\text{Entrada DBO}_5} \right) * 100$$

$$\% \text{ Remoción} = \left(\frac{1884 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}} - 440 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}}}{1884 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}}} \right) * 100$$

$$\% \text{ Remoción} \cong 77 \%$$

Fuente: (Leidy Carolina Gómez Ramirez Jeyson Gonzalo García Echavarría, 2018).

De acuerdo a los datos obtenidos se pudo dar solución al problema que presentaba el propietario de la finca Mi ranchito, ya que el tratamiento del agua residual a través del humedal cumple con los requisitos exigidos por la norma para poder verter en los cuerpos hídricos.

“La implementación de un modelo ModFlow en ModelMuse, fue una herramienta que permitió comprender el funcionamiento del humedal artificial. Sin embargo, los valores de concentración pueden variar, por los datos ingresados y asumidos en el modelo” (leidy carolina gómez ramirez jeyson gonzalo garcía echavarría, 2018).

“De acuerdo a los resultados de laboratorio de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) reportados a la entrada y salida del humedal artificial, se obtiene que el Porcentaje de remoción es de 77%, lo cual es un valor considerable para el poco tiempo que tiene el humedal artificial y a las altas cargas de concentración (DBO5), debido al mal funcionamiento del pozo séptico” (leidy carolina gómez ramirez jeyson gonzalo garcía echavarría, 2018).

Con este trabajo de investigación se puede dar por concluido que los humedales son muy importantes para el ser humano, ya que en muchas ocasiones las veredas o pueblos no poseen un alcantarillado cerca a los predios, ocasionando que estas aguas residuales no tenga un tratamiento previo antes de verter a los cuerpos hídricos ocasionando que las fuentes sean contaminadas, y con este proyecto se determina que estas aguas pueden ser tratadas a través de un humedal artificial para que el agua a verter cumpla con los parámetros exigidos por la norma y disminuyendo el impacto ambiental que estas aguas generan a los cuerpos hídricos y al medio ambiente.

2.1.2. Desarrollo de un micro humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario

Esta tesis fue elaborada por Ingrid Jaqueline Artero Ganuza, Maira Gricelda Quiusque Argueta en el Salvador en el año 2012, donde el proyecto de investigación tiene como propósito dar solución al grave problema que existe en el salvador, ya que más del 90% del recurso hídrico presenta altos niveles de contaminación, los cuales en su gran mayoría son generados desde las viviendas. Esto se produce, teniendo en cuenta que

estas aguas residuales no son tratadas generando un alto impacto de contaminación en el recurso hídrico.

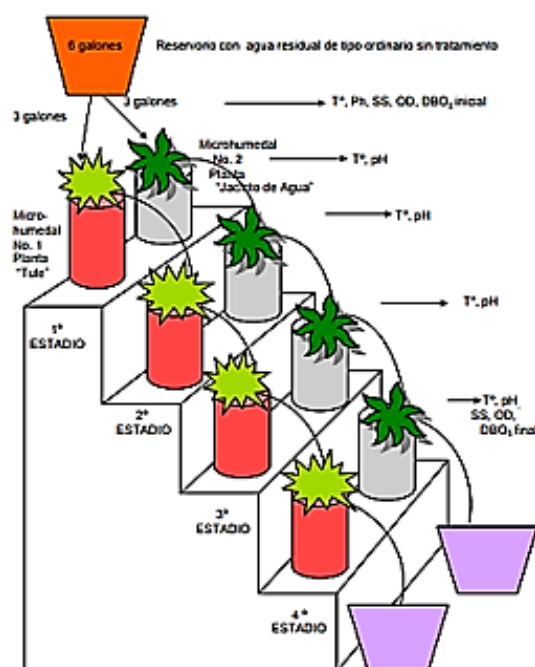
Si bien es cierto el agua es un recurso no renovable y es esencial para la vida ya que cubre más de la cuarta parte de la superficie de la tierra, a medida que pasa el tipo la industria y la población crece, se ha venido evidenciado en datos obtenidos en el ministerio del medio ambiente y Recursos Naturales (MARN) en el año 2012.

En el salvador existe alta contaminación de los recursos hídricos generando enfermedades y muerte infantil, impactos sociales e impactos económicos.

Para ayudar a dar una respuesta a las posibles soluciones se han diseñado mecanismos naturales como los humedales, donde se aprovechan las ventajas y se da como alternativa a esta problemática depurar las aguas que son utilizadas en las viviendas de tipo ordinario. En este caso, se realizaron dos micro humedales artificiales implementando en dos fases, donde en una fase se utiliza la planta de tule y en otra se utiliza la planta de Jacinto. Para el experimento fueron usados 6 galones de agua residual de tipo ordinario en dos fases por cada micro-humedal por un periodo de 6 semanas haciendo un total de 12 galones (Gricelda et al., 2012).

Para su diseño se colocaron cuatro cubetas plásticas con capacidad de cinco galones cada una, en una plataforma construida de madera, de modo que se simulara una cascada de cuatro estadios. luego se colocó una manguera en cada una de las cubetas dejando un extremo a 5 cm del fondo de la cubeta y el otro extremo a una altura de entre 5 y 10 cm sobre superficie del agua, la superficie de la siguiente cubeta, luego se colocó grava previamente lavada, cubriendo dos terceras partes de la altura de cada cubeta, después de ello se siembra cada planta en el micro humedal, se deja el tiempo necesario con el fin de que se estabilicen. Después de estabilizadas las plantas se inició el tratamiento (en dos fases) de las aguas residuales tipo ordinario, entre los meses de agosto y septiembre de 2009. La fase I se inició el 19 de agosto de 2009 (semana 1) y concluyó 16 de septiembre de 2009 (semana 5); la fase II se inició el 26 de agosto de 2009 (semana 2) y concluyó el 23 de septiembre de 2009 (semana 6).

Ilustración 11. Diseño microhumedales.



Fuente: (Gricelda et al., 2012).

Se realizó un análisis durante 6 semanas para determinar el comportamiento que tiene el micro-humedal, donde se midió a través de parámetros fisicoquímicos temperatura, pH, oxígeno y sólidos sedimentados.

Se trataron 12 galones de agua residual en las dos fases del micro-humedal que tiene 4 cubetas plásticas conectadas por una manguera cada una, se coloca grava lavada cubriendo dos terceras partes de la altura de la cubeta, se siembra la planta acuática de tule en la fase I y la planta de Jacinto en la fase II.

Como resultados se toma una muestra del agua residual antes para determinar las condiciones en la que se encuentra el agua y después de realizado el tratamiento a través del micro-humedal. Se toman muestras por cada una de estas, se realizan todos los estudios de laboratorio para determinar el tipo de sedimentos.

Se evidencia que las temperaturas a medida que avanzan las semanas van disminuyendo, el resultado de pH igual va disminuyendo y en color el agua mejora bastante, ya que cuando se ingresa el agua al micro-humedal su color es café oscuro y se observa turbia, luego de la fase I y II, el aspecto visual mejora, el agua queda con un color claro y los microorganismos y sedimentos disminuyen (Gricelda et al., 2012).

Tabla 4. Parámetros de funcionamiento de los 2 microhumedales.

| Fase 1 | | | Fase 2 | | |
|----------------------|---|---|----------------------|---|---|
| Semana | Vol. de agua residual de tipo ordinario (galones) | Parámetros | Semana | Vol. de agua residual de tipo ordinario (galones) | Parámetros |
| | 3 galones de agua sin tratamiento | T°, pH, SS, ODi, DBO ₅ inicial | | | |
| | ↓ | | | | |
| 1 | | | | | |
| | ↓ | pH, T° | | 3 galones de agua sin tratamiento | T°, pH, SS, ODi, DBO ₅ inicial |
| 2 | | | 1 | | |
| | ↓ | pH, T° | | ↓ | pH, T° |
| 3 | | | 2 | | |
| | ↓ | pH, T° | | ↓ | pH, T° |
| 4 | | | 3 | | |
| | ↓ | T°, pH, SS, ODf, DBO ₅ final | | ↓ | pH, T° |
| 5 | | | 4 | | |
| | | | | ↓ | T°, pH, SS, ODf, DBO ₅ final |
| 6 | | | 5 | | |
| Sub total de muestra | 3 galones de agua tratada | | Sub total de muestra | 3 galones de agua tratada | |
| Total de muestra | 6 galones de agua tratada | | | | |

Fuente: (Gricelda et al., 2012).

Ilustración 12. Muestras de agua residual antes y después del tratamiento con microhumedales artificiales

Fase I.

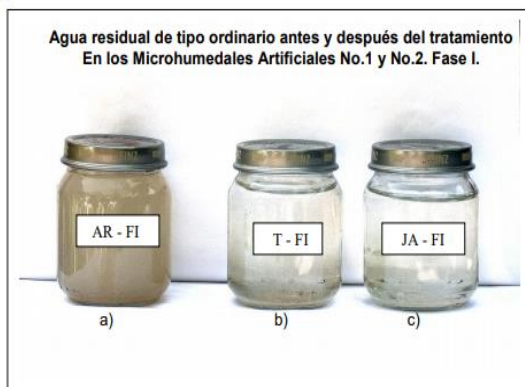


Figura N° 13 Agua residual de tipo ordinario antes y después del tratamiento en los Microhumedales Artificiales No.1 y No.2. Fase I.
a) Agua residual de tipo ordinario al inicio del tratamiento;
b) Agua residual de tipo ordinario tratada en el microhumedal artificial No. 1 con planta de Tule;
c) Agua residual de tipo ordinario tratada en el microhumedal artificial No. 2 con planta de Jacinto de Agua.

Fase II.

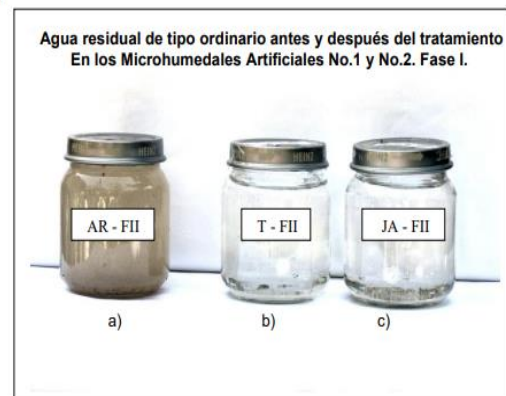


Figura N°14 Agua residual de tipo ordinario antes y después del tratamiento en los Microhumedales Artificiales No.1 y No.2. Fase I.
a) Agua residual de tipo ordinario al inicio del tratamiento;
b) Agua residual de tipo ordinario tratada en el microhumedal artificial No. 1 con planta de Tule;
c) Agua residual de tipo ordinario tratada en el microhumedal artificial No. 2 con planta de Jacinto de Agua.

Fuente: (Gricelda et al., 2012).

Se evidencia que la planta tule tiene una mayor depuración en el agua ya que los sedimentos son menores.

Se concluyó que el tratamiento de aguas residuales es de alta eficiencia ya que ayuda a reutilizar el agua y además genera que tengan un menor impacto ambiental frente a la contaminación (Gricelda Et Al., 2012).

2.1.3. Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia Psittacorum* (Heliconiaceae)

El presente artículo fue desarrollado por Enrique Salamanca, Carlos Parra, Jesús Sánchez y Javier Vásquez de la Universidad del Valle de Colombia. Ellos presentan una investigación que tiene como objetivo examinar el papel de algunas plantas tropicales y de la especie *Heliconia psittacorum* en los procesos de transformación y eliminación de la materia orgánica en sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales.

Para la realización de este objetivo presentan una tabla en la cual se reúnen todas las plantas que se han trabajado para el proceso de fitorremediación. (Enrique, Carlos y Javier 2013).

Tabla 5. Algunas especies vegetales nativas tropicales utilizadas en fitorremediación.

| Especie | Aplicación | Referencia |
|--|---|---|
| <i>Colocasia esculenta</i> (Oreja de burro) | Fitoremediación de mercurio | Skinner <i>et al.</i> , (2007). |
| | Reducción de nitrato, fósforo, sulfato, | Mbuligwe, (2004). |
| | Reducción de pesticidas y herbicidas | Cheng <i>et al.</i> , (2002). |
| | Eliminación de nitrato, fósforo y DQO | Bindu <i>et al.</i> , (2008). |
| | Eliminación de NH_4^+ y NO_3^- | Morgan <i>et al.</i> , (2008). |
| | Eliminación de Cd. | Mandakini <i>et al.</i> , (2005). |
| <i>Peltandra alliacea</i> (Anamú) | Efecto del nitrógeno e irradiación en la eficiencia fotosintética | Pérez <i>et al.</i> , (2007). |
| <i>Echinochloa colona</i> (Liendre de puerco) | Efecto en la germinación por sometimiento a Cr(VI) | Rout <i>et al.</i> , (2000). |
| <i>Vetiveria zizanioides</i> (Vetiveria) | Reducción de nitrógeno amoniacal, total, fósforo total, DBO, DQO | Xiao <i>et al.</i> , (2009) |
| | Efectos en el crecimiento por exposición a Lixiviados. | Rotkittikhun <i>et al.</i> , (2007) |
| | Efecto por el riego con fertilizantes | Edelstein <i>et al.</i> , (2009). |
| <i>Heliconia psittacorum</i> (Heliconia) | Efecto en el crecimiento al riego con lixiviados de rellenos sanitarios | Torres y Vásquez, (2010) |
| | Eliminación de DBO ₅ , DQO, Nitrato, TKN, NH_4^+ , orto fosfato y SST | Ascuntar y Toro (2007); Gutiérrez (2009); Mosquera (2010); Ascuntar- <i>et al.</i> , (2009) |
| | Eliminación de DQO, P-PO_4 , NH_4^+ , NO_3^- | Sandoval (2010); Konnerup <i>et al.</i> , (2009). |
| | Eliminación de Materia orgánica y nutrientes | Paulo <i>et al.</i> , (2008) |
| | Eliminación de metales pesados: Cd (II), Cr (VI), Pb (II) y Hg (II). | Madera <i>et al.</i> , 2013 |
| | Eliminación de Cr (VI) y Nitrógeno. | Cortes <i>et al.</i> , 2013a. |
| | Eliminación de DQO, DBO ₅ y NH_4^+ | Cortes <i>et al.</i> , 2013b |
| <i>Gynerium sagittatum</i> (Caña brava) | Biomasa y crecimiento de la especie | Torres y Vásquez, (2010). |
| | Eliminación de DBO ₅ , DQO, NH_4^+ y NO_3^- | Stewart, (2005). |
| | Eliminación de Cr (VI) y Nitrógeno | Cortes <i>et al.</i> , 2013a. |
| | Eliminación de metales pesados: Cd (II), Cr (VI), Pb (II) y Hg (II) | Madera <i>et al.</i> , 2013 |

Fuente:(Enrique, Carlos, & Javier, 2013a).

Se reportan los resultados del potencial fitorremediador de dos plantas en humedales construidos subsuperficialmente. Uno sin vegetación, otro con la planta *Heliconia psittacorum* y el otro con la planta *Phragmites australis*. En una tabla compararon los resultados del proceso de descontaminación de aguas residuales. El montaje fue el siguiente:

Ilustración 13. Humedal construido subsuperficial



Fuente: (Enrique, Carlos, & Javier, 2013b).

Los resultados de eliminación de materia orgánica y de otros elementos como el DQO y el DBO5 se encuentran a continuación:

Tabla 6. Porcentaje de eliminación promedio para los tres casos.

| Parámetro | <i>H. psittacorum</i> | <i>P. australis</i> | Sin Plantas (SP) |
|--|--|--|------------------------------------|
| DBO ₅ | A&T* 63 | 63 | 63 |
| | G&S** 60 | 80 | 74 |
| | Ga*** 68 | 79 | 71 |
| | S**** 65 | 77 | 70 |
| | Gb***** 57 | - | 52 |
| | Mo+++ 97 | | 97 |
| DQO | A&T* 59 (Totales) y 42 (Filtrada) | 58 (Totales) y 41 (Filtrada) | |
| | G&S** 63 | 77 | |
| | Ga*** 63 | 70 | |
| | S**** 65 (Totales) y 52 (Filtrada) | 74 (Totales) y 53 (Filtrada) | |
| | Gb***** 53 | - | |
| | Mo+++ 95 | | |
| SST | A&T* 90 | 88 | 91 |
| | G&S** 78 | 85 | 79 |
| | Ga*** - | - | - |
| | S**** 84 | 87 | 85 |
| | Gb***** - | - | - |
| Nitrógeno Amoniacal (NH ₃ /NH ₄ ⁺) | A&T* Disminución longitudinal | Variación longitudinal | Disminución longitudinal |
| | G&S** 9 | 39 | 9 |
| | Ga*** 18(NH ₄ ⁺) | 36(NH ₄ ⁺) | 10 (NH ₄ ⁺) |
| | S**** 20(NH ₄ ⁺) | 38 (NH ₄ ⁺) | 9 (NH ₄ ⁺) |
| | Gb***** 33(NH ₃) | - | 27 (NH ₃) |
| Nitritos y Nitratos (NO ₂ ⁻ /NO ₃ ⁻) | A&T* | Concentraciones heterogéneas en cada etapa | |
| | G&S** 43(NO ₂ ⁻) | 65 (NO ₂ ⁻) | 48 (NO ₂ ⁻) |
| | Ga*** - | - | - |
| | S**** -32y -49 | 65 y -112 | -22 y -77 |
| | Gb***** -3,4 (NO ₂ ⁻) | | 16 (NO ₂ ⁻) |
| | Ma+ 48 y 35 (NH ₄ ⁺ y NO ₃ ⁻) | | 45 (NH ₄ ⁺) |
| | Co+++ 40 (NO ₂ ⁻) 50 (NH ₄ ⁺) | - | - |
| Fosfatos (PO ₄) | A&T* | Comportamiento oscilatorio en sentido longitudinal (La mayor parte de porcentajes de eliminación fueron negativos) | |
| | G&S** | Oscilación permanente | |
| | Ga*** -111 | -257 | -244 |
| | S**** 10 | 30 | 10 |
| | Gb***** 10 | - | 23 |
| Metales | Ma+ 95 Cd, Pb, Hg, Cr (VI) | - | 90 |
| | Co+++ 60 Cr (VI) | | - |

*A&T-> Ascúntar & Toro (2007) **G&S-> Gómez & Segura (2008) ***Ga-> Gutiérrez (2009a);****S-> Sandoval (2009); *****Gb-> Gutiérrez (2009b); + Ma>Madera et al., 2013; ++ Co>Cortes et al., 2013; Mo+++>Montoya et al, 2010.

Fuente:(Enrique et al., 2013b).

A partir de los resultados expuestos se encuentra que ambas especies contribuyen con la eliminación de contaminantes en igual proporción. Claro que se evidencia un mejor desempeño de la planta *Heliconia* Sp en la eliminación de DQO (Demanda química de oxígeno) y DBO₅ (Demanda biológica de oxígeno). La eliminación de nitrógeno amoniacal y de nitritos fueron mayores en la planta *P. australis*, lo cual puede estar asociado a que las raíces de esta planta al ser más extensas y abundantes ofrecen una mayor área para transferencia de oxígeno y formación de comunidades de microorganismos.

También se encontró una diferencia en la eficiencia fotosintética de ambas especies. Debido a que tienen un metabolismo diferente. La planta *Australis* pertenece a las plantas tipo C₄ y estas usan eficientemente el nitrógeno, el dióxido de carbono, la radiación solar y el agua. La planta *Heliconia* pertenece al tipo C₃.

La planta *Heliconia* ps. Presenta resultados positivos en cuanto la eliminación de metales pesados como el cadmio, plomo, mercurio y cromo, presentes en aguas contaminadas. En sus resultados se evidencia un porcentaje de eliminación superior al 90%, y a su vez la planta no presenta ningún daño en sus hojas como clorosis (amarillamiento del tejido foliar por falta de clorofila).

En la **Tabla 7** se describen las respuestas fisiológicas que tuvo la planta *Heliconia* durante los procesos de descontaminación en el humedal construido subsuperficialmente

Tabla 7. Respuestas fisiológicas de *heliconia psittacorum*.

| | Diferencia con plantas control | Rango | Observaciones |
|---------------------------|--------------------------------|--|--|
| Nitrógeno Foliar | Si | 2,6 a 5,6mg/g | Incremento de la asimilación en la entrada del humedal proporcional al incremento de la biomasa. |
| Potencial Hídrico | Si | -1,31 a -0,04Mpa Entrada: -1,7 a 0,49 Salida: -2,11 a 0,18 | Valores de potencial cercanos a cero a la entrada del humedal y más negativos a la salida, en relación con los requerimientos hídricos en la planta. |
| Eficiencia Fotosintética | No | 0,78 a 0,85 Valor normal 0,8 a 0,87 | Respuesta fotosintética positiva a lo largo del humedal. |
| Biomasa | Si | Concentración de Nitrógeno Entrada>Medio>Salida | Alcanzó su crecimiento máximo a la entrada del humedal. |
| Parámetros Físicoquímicos | - | Nitrato>Nitrito>Amonio | Los datos permiten establecer el comportamiento del humedal para la eliminación de nitrógeno. |

Fuente:(Enrique et al., 2013b).

El estudio realizado con la planta *Heliconia psittacorum* y la planta *Australis*, demuestra que estas plantas presentan características de aclimatación adecuadas a las condiciones de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales del país. Sus resultados aportan bastante a la presente investigación ya que plantean el uso de estas

plantas para mejorar la calidad de las aguas residuales en los cuerpos hídricos de Colombia.

2.1.4. Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales.

El siguiente artículo fue desarrollado por Juan Pablo Rodríguez, Esteban Gómez, Laura Garavito y Francy López de la Universidad Manuela Beltrán de Colombia. Ellos presentan una investigación que tiene como objetivo realizar un análisis comparativo entre los resultados de laboratorio obtenidos con el buchón y lenteja de agua. Determinando a su vez cual es el sistema biológico óptimo al utilizar estas dos plantas acuáticas.

Para el desarrollo de su investigación realizaron el diseño de dos reactores de humedales artificiales para cada una de las plantas acuáticas. El agua empleada es una mezcla de agua residual doméstica, industrial e institucional. Esta es transportada a los dos tanques de cada humedal de capacidad 30 litros cada uno. El agua se distribuye mediante una tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada en PVC. Posteriormente el agua residual llega a una cámara presedimentadora de sólidos de gran tamaño, para luego pasar a un vertedero que permite medir el caudal de entrada.

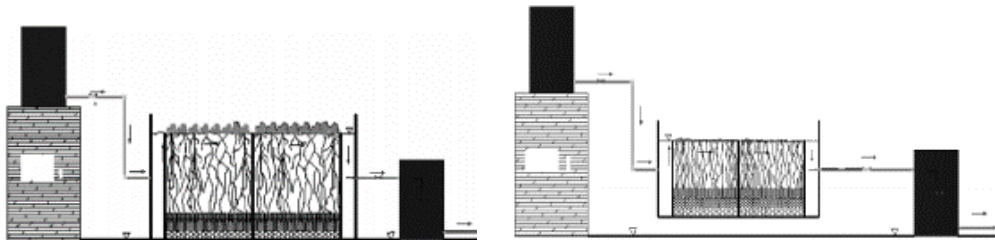
Realizan una descripción de las dimensiones, tiempo de retención, caudal diario de alimentación, área superficial, carga orgánica y carga hidráulica para cada humedal. Los cuales se presentan a continuación:

Tabla 8. Dimensiones humedal buchón y lenteja de agua.

| Parámetros diseño | Buchón de agua | Lenteja de agua |
|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Largo | 1.20 m | 0.90 m |
| Ancho | 0.40 m | 0.30 m |
| Profundo | 0.60 m | 0.40 m |
| Altura lecho | 0.15 m | 0.15 m |
| Timempo de retención | 7 días | 3 días |
| Caudal de alimentación | 30 l/día | 30 l/día |
| Área superficial | 0.48 m ² | 0.27 m ² |
| Carga orgánica | 114.4 kg/ha día | 203.3 Kg/ ha día |
| Carga hidráulica | 62.5 l/día m ² | 110 l/día m ² |

Fuente: (Rodríguez-Miranda, Gómez, Garavito, & López, 2010).

Ilustración 14. Reactor de humedal artificial utilizando buchón de agua (lado izquierdo) y lenteja de agua (lado derecho).



Fuente:(Rodríguez-Miranda et al., 2010)

El humedal artificial que instalaron corresponde a un sistema de agua superficial libre. La toma de muestras las realizó todos los días durante 8 semanas. Realizando este muestreo en la entrada y salida de los dos reactores. Los parámetros para el monitoreo de las muestras fueron los siguientes:

Tabla 9. parámetros para el monitoreo.

| Parámetros | Método de análisis |
|-------------------|--------------------------------------|
| Alcalinidad total | Potenciómetro o indicador ácido-base |
| Conductividad | Conductímetro |
| Sólidos disueltos | Conductímetro |
| DQO | Titulométrico de reflujo cerrado |
| pH | pH metro |
| Temperatura | pH metro |

Fuente: (Rodríguez-Miranda et al., 2010).

Los parámetros de la calidad del agua utilizada fueron los siguientes:

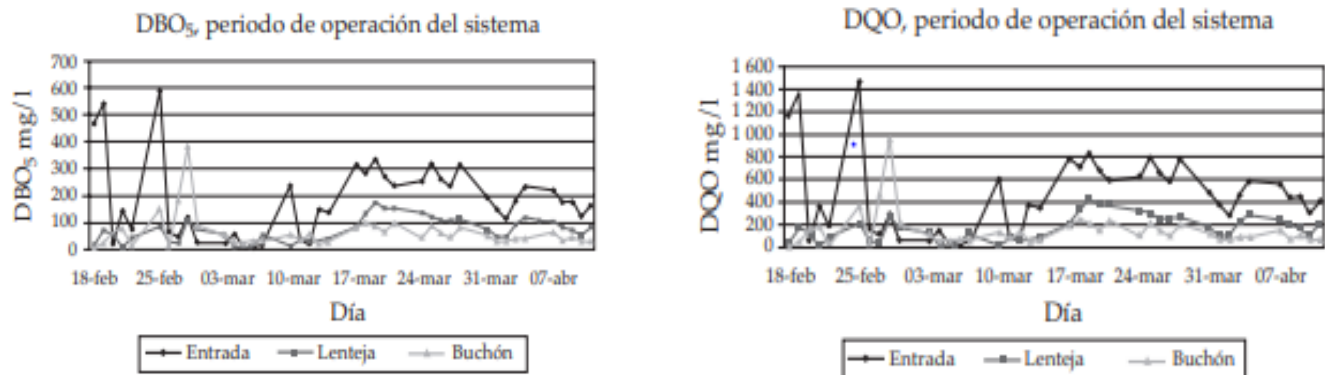
Tabla 10. parámetros de calidad de agua del afluente.

| Parámetros | Resultados afluente |
|---|---------------------|
| Alcalinidad total (mg/l CaCO_3) | 13 ± 7.0 |
| Conductividad ($\mu\text{siemens/cm}$) | 58.45 ± 36 |
| Sólidos disueltos (mg/l) | 7.3 ± 1.5 |
| DQO (mg/l) | 456.7 ± 354.8 |
| DBO_5 (mg/l) | 182.6 ± 142 |
| pH | 6.7 ± 0.53 |
| Temperatura | 15 ± 2.0 |

Fuente: (Rodríguez-Miranda et al., 2010).

Se observó en ambos humedales artificiales un comportamiento denominado flujo pistón, quiere decir que este comportamiento permite una mejor remoción de materia orgánica. En cuanto a la demanda biológica de oxígeno, el buchón presenta una mejor adaptación, generando una mayor remoción de materia orgánica en comparación con la lenteja de agua. Se identificó que la cámara presedimentadora influye en la remoción de DBO_5 debido a la sedimentación y filtración de la primera sección del humedal por la influencia de la grava y de las raíces de las plantas. Al igual se presenta resultados muy similares con la remoción de DQO.

Ilustración 15. Comportamiento DBO_5 y DQO en los humedales artificiales.

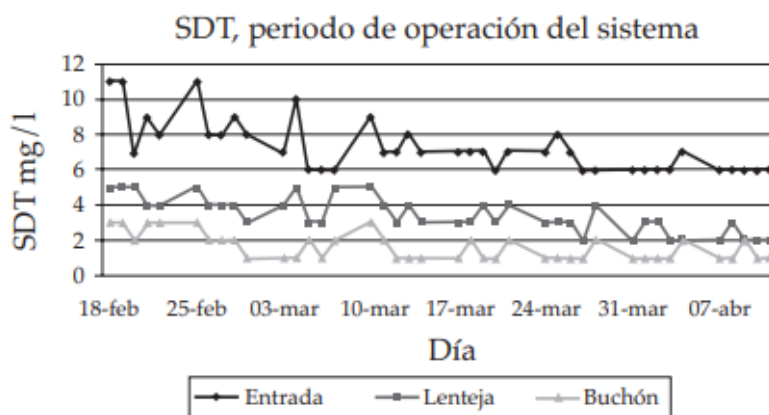


Fuente: (Rodríguez-Miranda et al., 2010).

Según los resultados de la **Ilustración 15** se evidencia que los porcentajes de remoción de DBO_5 y DQO en la planta lenteja y buchón de agua son bastantes similares.

Durante la semana 5 el humedal artificial con buchón de agua presenta remociones superiores al 70% y el humedal artificial con lenteja de agua presenta remociones superiores al 50%. Los sólidos en los efluentes del buchón de agua fueron en mayor proporción, debido a que esta planta tiene un sistema radicular más denso en comparación con el sistema radicular que tiene la lenteja de agua (Rodríguez-Miranda et al. 2010).

Ilustración 16. Comportamiento de los sólidos disueltos totales en los humedales artificiales.

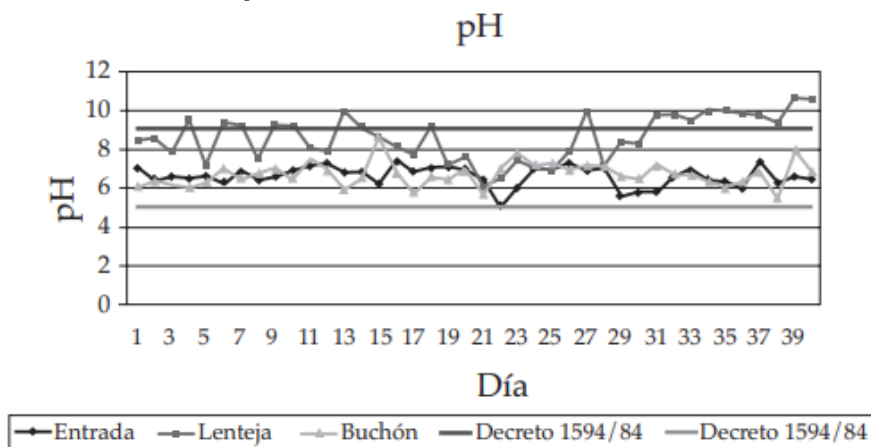


Fuente: (Rodríguez-Miranda et al., 2010).

En la **Ilustración 16** se observa el comportamiento presentado por los sólidos disueltos totales durante la fase de operación del sistema. Presentando una mayor reducción de estos sólidos en la planta buchón de agua.

También de acuerdo a los resultados obtenidos de pH, se obtiene que la planta lenteja de agua tiene los valores máximos cercanos a 11, por el contrario, la planta buchón de agua presenta valores de 6 a 8 generando estabilización en el sistema y optimización en la remoción de materia orgánica (Rodríguez-Miranda et al. 2010).

Ilustración 17. Comportamiento del PH en humedales artificiales.



Fuente: (Rodríguez-Miranda et al., 2010).

A partir de la comparación que realizaron en esta investigación, se plantea realizar un proceso similar entre la planta subacuática junco y la planta ornamental seleccionada, comparando la eficiencia de remoción que tiene cada una.

2.1.5. Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas.

El siguiente artículo es investigado por Jaqueline García Hernández, Carlos Valdés-Casillas, Lázaro Cadena-Cárdenas, Socorro Romero-Hernández, Susana Silva-Mendizábal, Gamaliel González-Pérez, Germán N. Leyva-García y Daniela Aguilera-Márquez, en el año 2011 en la ciudad de México.

La investigación desea dar un informe evidente de la problemática que se presenta hace más de 15 años, en la alta contaminación que genera los drenes agrícolas, ya que la agricultura de riego constituye al menos el 25% del país. El uso de riego es de suma importancia para la producción agrícola, por lo cual es utilizado el drenaje, el cual se utiliza para darle una salida a las aguas que se acumulan en los cambios topográficos del suelo, generando un impacto ambiental ya que las aguas drenadas no son tratadas.

Lo que transporta los drenes agrícolas son sedimentos, sales, y todos los contaminantes orgánicos e inorgánicos que se presentan en el suelo o aguas de los cultivos. Como a estos drenes no se les realiza un manejo de depuración, estos sedimentos contaminan las bahías afectando de manera directa o indirecta la vida marina y el recurso hídrico (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales et al., 2011).

Como tal no existe una ley o propósito de mejorar el medio ambiente en cuanto a la contaminación que se está generando en el lugar causado por los drenes agrícolas; lo que hace la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es mantener los drenes limpios de sedimento y maleza, para que cumplan su función de drenaje (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales et al., 2011).

Sin embargo en la investigación se monitorean más de 60 puntos donde a través de los datos recolectados, se evidencia que existe un alta contaminación que cada vez afectan más a los ecosistemas marinos y costeros, prueba de ello son las afloraciones de mareas rojas tóxicas en regiones donde no era común encontrarlas, la mortandad de peces y por lo cual se propone con suma de urgencia el manejo de esas aguas transportadas donde se diseñe un tratamiento de aguas residuales con el fin de que tengan un menor impacto ambiental al momento de que desemboquen en la bahías.

La alternativa que se busca es que sea efectiva y de bajos costos por lo cual proponen utilizar un sistema de humedal artificial. Ya que en México cuentan con la tecnología

desarrollada y aplicada en algunos sitios como en el lago de Pátzcuaro (Urquiza-Marín et al., 2006; Rodríguez-Miranda et al., 2010) y en Texcoco (Arcos-Ramos et al., 1999) en donde se han tenido excelentes resultados, con remociones de contaminantes y cumplimiento con las Normas Mexicanas en los efluentes. Sin embargo, el estado es el que no coordina la implementación del plan de tratamiento de agua (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales et al., 2011).

2.1.6. Uso de plantas ornamentales en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Este trabajo de investigación es presentado por la bióloga Alejandra Méndez Mendoza del colegio de la frontera sur. El objetivo de este trabajo fue comparar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas de las siguientes plantas ornamentales:

- Alpinia purpurata.
- Heliconia Stricta.
- Heliconia psittacorum.
- Typha domingensis.

Debido a agentes externos las plantas Alpinia purpurata y Typha domingensis tuvieron que ser desmontadas por inconsistencias en los datos.

Las plantas se incorporaron en humedales contruidos artificialmente de flujo subsuperficial horizontal en la finca cafetera “La Concepción”, Tapachula, Chiapas México; con la intención de no encontrar diferencia alguna en los niveles de remoción y transformación en los contaminantes de las 2 especies evaluadas (Heliconia Stricta y Heliconia psittacorum) (Alejandra Méndez 2014).

Los parámetros que se analizaron en laboratorio fueron los siguientes:

- Nitrógeno total, Fósforo total, DQO, DBO₅.

Después de dos meses de ser plantadas las plantas. Se registraron las siguientes alturas a los 2 y 7 meses:

Tabla 11. Altura promedio de las heliconia en los 2 y 7 meses.

| Altura promedio | <i>Heliconia psittacorum</i> | <i>Heliconia stricta</i> |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|
| 2 meses | 40±25 cm | 70±12 cm |
| 7 meses | 47±22 cm | 123±18 cm |

Fuente:(Alejandra Méndez, 2014).

De acuerdo con los resultados, se determina que estas plantas alcanzan su etapa de madurez aproximadamente un año después de la siembra.

Ilustración 18.*Heliconia stricta* (izquierda). *heliconia psittacorum* (derecha).



Fuente:(Alejandra Méndez, 2014).

Los resultados de remoción de DQO y DBO₅ son similares en ambas plantas al tomar las muestras en las 12 y 24 horas, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 12. Porcentaje de remoción promedio.

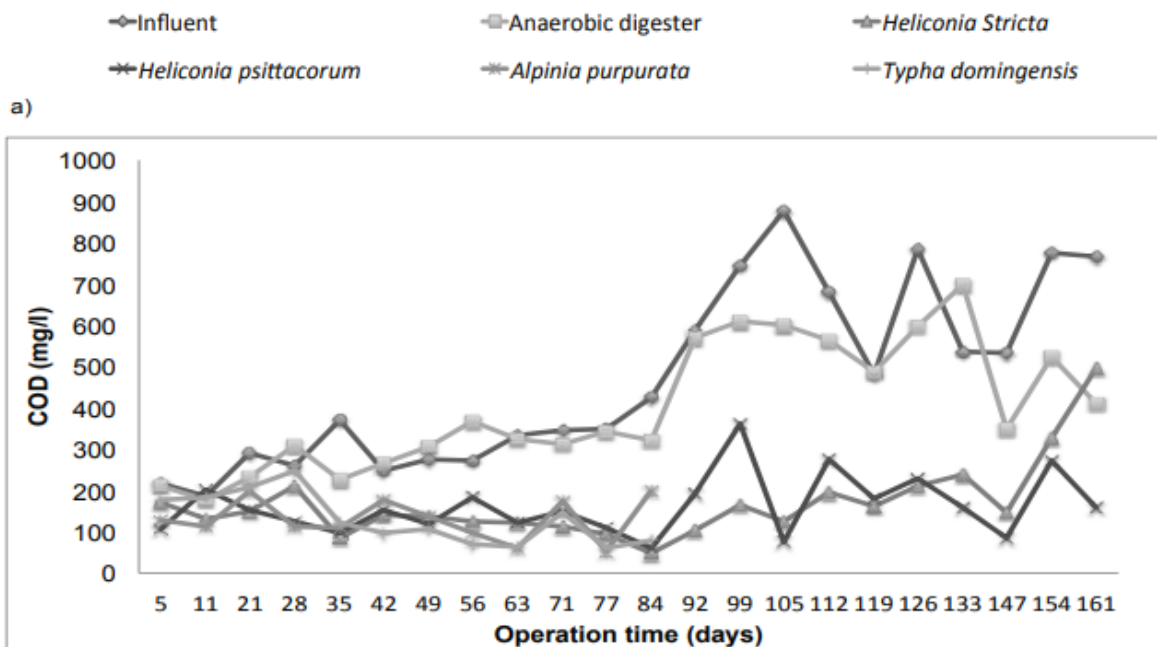
| | COD (%) | BOD5 (%) | TN (%) | TP (%) |
|-----------------------|-------------|----------|------------|----------|
| TRH 24 h | | | | |
| <i>H. stricta</i> | 48.57±14.71 | 36.59±15 | | |
| <i>H. psittacorum</i> | 49.05±10.56 | 39.23±14 | | |
| HRT 12 h | | | | |
| <i>H. stricta</i> | 55.43±27 | 52.48±31 | 34.82±6.32 | 16±18.91 |
| <i>H. psittacorum</i> | 63.83±4.21 | 57.68±17 | 34.65±11.1 | 20±22.83 |

Fuente:(Alejandra Méndez, 2014).

De acuerdo con los resultados obtenidos en **Tabla 12**, se evidencia que la planta *Heliconia stricta* y *Heliconia psittacorum* tienen porcentajes de remoción de DBO_5 y DQO muy similares.

Dónde COD es demanda química de oxígeno y BOD_5 es demanda biológica de oxígeno. De acuerdo con la cantidad de remoción de estos parámetros, se afirma que las aguas residuales empleadas fueron mayormente biodegradables.

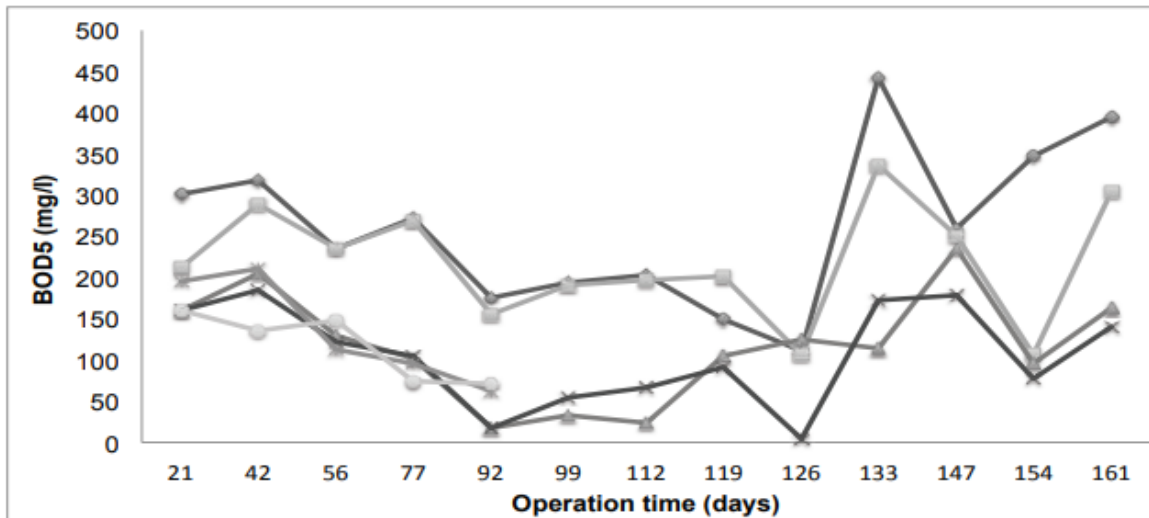
Ilustración 19. Comparación gráfica en remoción de DQO.



Fuente: (Alejandra Méndez, 2014).

La **Ilustración 19** y la **Ilustración 20** muestran una comparación gráfica de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio para las plantas ornamentales *Heliconia Stricta*, *Heliconia psittacorum*, *Alpinia purpurata* y *Typha domingensis*.

Ilustración 20. Comparación gráfica en remoción de DBO₅.



Fuente:(Alejandra Méndez, 2014).

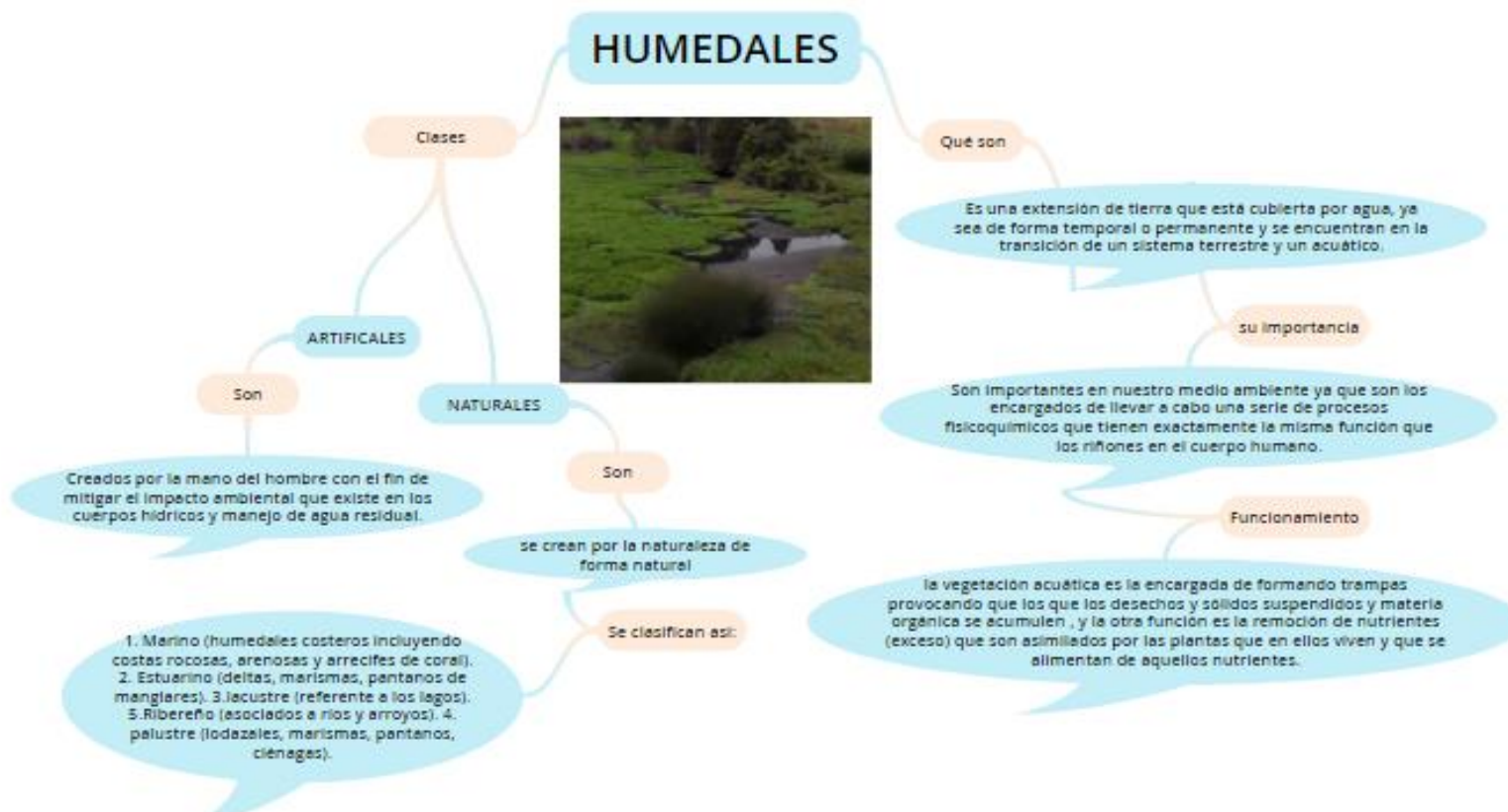
De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que estas plantas ornamentales son capaces de adaptarse y crecer bien en un humedal artificial, con lecho de grava y flujo horizontal alimentado por aguas residuales domésticas. Esta habilidad las convierte en una óptima opción para mejorar el sistema de tratamiento que se da a las aguas contaminadas, aportando valor estético al sistema (Alejandra Méndez, 2014).

De acuerdo con esta investigación se identifica que para el proyecto de rediseño del prototipo de humedal de la Universidad Católica de Colombia es viable la selección de una especie ornamental para con ella determinar los parámetros que exige la normativa colombiana en cuanto a calidad de agua (Decreto 3930 de 2010) y la OMS (organización mundial de la salud).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Para comenzar se realiza la definición de lo que es un humedal, las clases que existen, la importancia que cumplen en nuestro medio ambiente, se identifica de acuerdo a la **Ilustración 21**, que la vegetación en el humedal es la encargada de formar trampas para que los sólidos suspendidos y materia orgánica se acumulen.

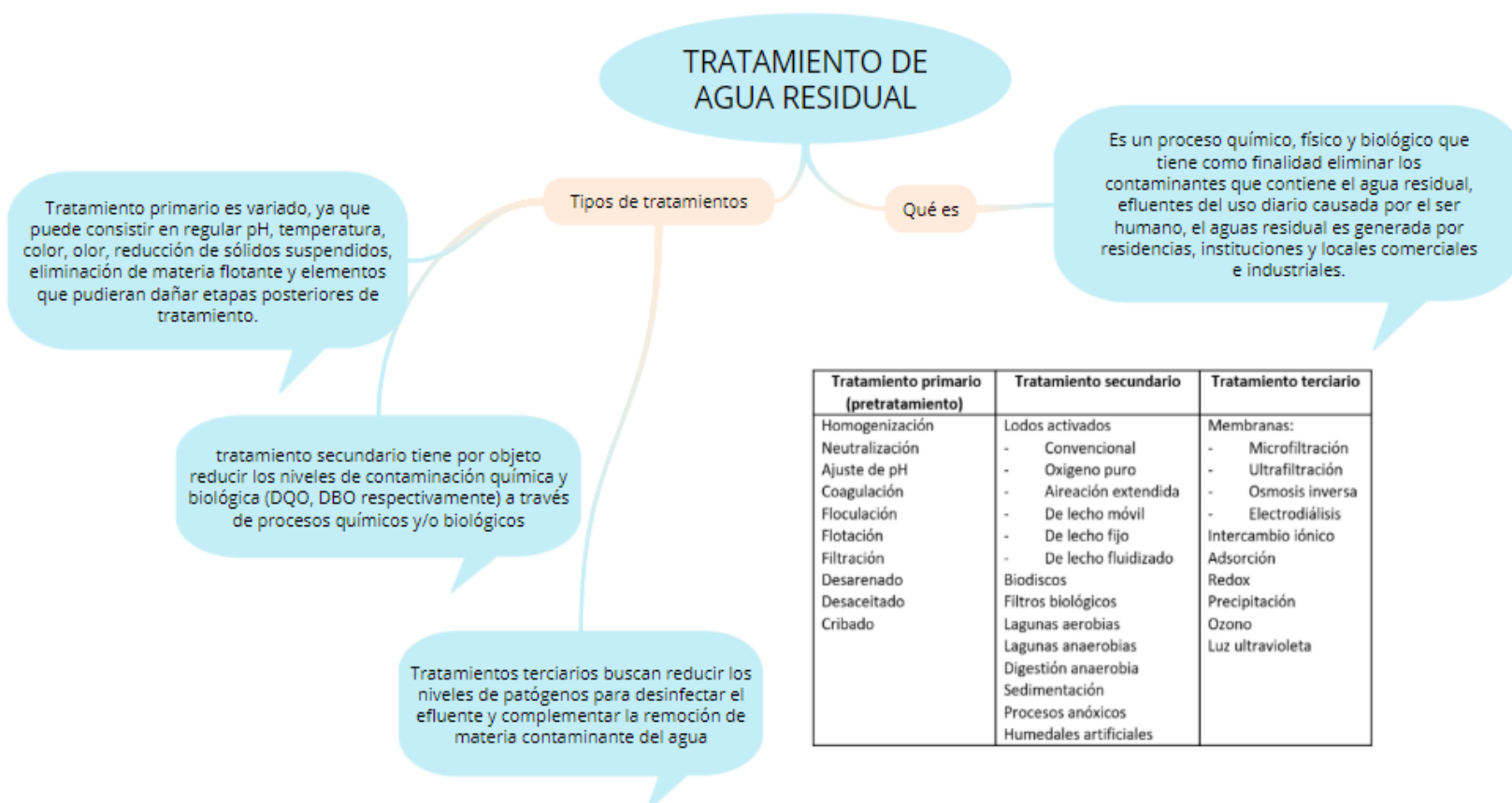
Ilustración 21. Humedales



Fuente: Propia

De acuerdo con la **Ilustración 22**, se identifica que el humedal artificial es un tratamiento secundario que permite reducir los niveles contaminantes químicos y biológicos (DQO, DBO) que contiene el agua residual.

Ilustración 22. Tratamiento de agua residual.



Fuente: Propia

2.3. MARCO LEGAL

“El uso de aguas residuales para el riego de cultivos es cada vez más común. El rendimiento de los cultivos es superior, ya que las aguas residuales contienen nutrientes para el desarrollo de las plantas. Sin embargo, existe el riesgo de que el riego con aguas residuales facilite la transmisión de enfermedades relacionadas con nemátodos y bacterias fecales a consumidores y agricultores” (LOPERA & CAMPOS, 2011).

“En lo que se refiere a las cifras, se encontró que de la superficie del territorio nacional dedicada a la actividad agropecuaria, tan solo el 8% está dedicado exclusivamente a la producción agrícola, en este sentido y de acuerdo a las estimaciones realizadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM durante el año 2004, la demanda de agua para uso agrícola, dentro de los otros usos disponibles (doméstico, industrial, pecuario y servicios) presenta el mayor porcentaje de uso correspondiente al 54%” (LOPERA & CAMPOS, 2011).

“Colombia cuenta con una superficie irrigada con aguas residuales de 1.230.193 ha, con 27% de agua residual tratada y 73% sin tratar, por lo general diluida con aguas superficiales; al igual que sucede en toda América Latina, no se cuenta con información completa y confiable sobre el tema del reúso y solamente 8% del total de aguas residuales que se producen diariamente es tratado” (LOPERA & CAMPOS, 2011).

“En Colombia se utilizan aguas residuales crudas o parcialmente tratadas de origen doméstico, pecuario (cría de vacunos y cerdos, especialmente) e inclusive industrial y agroindustrial para el riego de cultivos. En la Sabana de Bogotá, en el distrito de riego y drenaje de la Ramada, se riegan 3.500 ha de cultivos de hortalizas, flores y pastos con un caudal de 1,5 m³ de agua bombeada del río Bogotá, que pasan a través de humedales naturales como forma de tratamiento” (LOPERA & CAMPOS, 2011).

Para el correcto desarrollo del proyecto, fue necesario seguir una serie de normas y documentación que permitieron realizar el procedimiento de manera técnica y con fundamentos sobre el reúso para el agua obtenida del rediseño del humedal artificial, con el fin de brindar confianza y seguridad a los beneficiados.

Estos documentos mencionados anteriormente son:

- Resolución No 1207 del 25 de Julio 2014: Disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos | US EPA.

- Organización mundial de la salud – OMS.
- Decreto 1594 de 1984: Reglamenta sobre usos del agua y residuos líquidos. Libro Calidad De Agua Autor Jairo Alberto Romero Rojas
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO)
- Resolución 631 de 2015

A continuación, se presentan las guías que establecen los límites para algunos parámetros de calidad de agua usada para riego:

2.3.1. Resolución colombiana 1207 de 2014

Uso Agrícola. Para el riego de:

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.
- Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
- Jardines en áreas no domiciliarias



Tabla 13. Criterios de calidad de agua residual para empleo de riego

| Variable | Unidad de Medida | Valor Límite Máximo Permisible |
|---|--------------------------|--------------------------------|
| FÍSICOS | | |
| pH | Unidades de pH | 6,0 – 9,0 |
| Conductividad | $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 1.500,0 |
| MICROBIOLÓGICOS | | |
| Coliformes Termotolerantes | NMP/100 mL | $1,0 \cdot E(+5)$ |
| Enterococos Fecales | NMP/100 mL | $1,0 \cdot E(2)$ |
| Helmintos Parásitos Humanos | Huevos y Larvas/L | 1,0 |
| Protozoos Parásitos Humanos | Quistes/L | 1,0 |
| <i>Salmonella sp</i> | NMP/100 mL | 1,0 |
| QUÍMICOS | | |
| Fenoles Totales | mg/L | 1,5 |
| Hidrocarburos Totales | mg/L | 1,0 |
| Iones | | |
| Cianuro Libre | mg CN/L | 0,2 |
| Cloruros | mg Cl/L | 300,0 |
| Fluoruros | mg F/L | 1,0 |
| Sulfatos | mg SO_4^{2-} /L | 500,0 |
| Metales | | |
| Aluminio | mg Al/L | 5,0 |
| Berilio | mg Be/L | 0,1 |
| Cadmio | mg Cd/L | 0,01 |
| Cinc | mg Zn/L | 3,0 |
| Cobalto | mg Co/L | 0,05 |
| Cobre | mg Cu/L | 1,0 |
| Cromo | mg Cr/L | 0,1 |
| Hierro | mg Fe/L | 5,0 |
| Mercurio | mg Hg/L | 0,002 |
| Litio | mg Li/L | 2,5 |
| Manganeso | mg Mn/L | 0,2 |
| Molibdeno | mg Mo/L | 0,07 |
| Níquel | mg Ni/L | 0,2 |
| Plomo | mg Pb/L | 5,0 |
| Sodio | mg Na/L | 200,0 |
| Vanadio | mg V/L | 0,1 |
| Metaloides | | |
| Arsénico | mg As/L | 0,1 |
| Boro | mg B/L | 0,4 |
| No metales | | |
| Selenio | mg Se/L | 0,02 |
| Otros parámetros | | |
| Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto) | mg Cl_2 /L | Menor a 1,0 |
| Nitratos (NO_3^- -N) | mg/L | 5,0 |

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Uso Industrial. En actividades de:

- Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.
- Descarga de aparatos sanitarios.
- Limpieza mecánica de vías
- Riego de vías para el control de material particulado.

Tabla 14. Criterios de calidad de agua residual para empleo industrial.

| Variable | Unidad de Medida | Valor Límite Máximo Permisible | | | |
|--|----------------------|--|---------------------------------|---|----------------------------------|
| | | Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas | Descarga de Aparatos Sanitarios | Limpieza mecánica de vías y Riego de vías para el control de material particulado | Sistemas de redes contraincendio |
| FISICOQUÍMICOS | | | | | |
| pH | Unidades de pH | 6,0 – 9,0 | 6,0 – 9,0 | 6,0 – 9,0 | 6,0 – 9,0 |
| Otros | | | | | |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días (DBO ₅) | mg O ₂ /L | | | 30,0 | |

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

2.3.2. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA y Norma oficial mexicana.

➤ Reúso Urbano

**Tabla 15. Criterio de calidad de agua para riego en uso urbano sin restricción .
(EPA)**

| Parámetro | Guías EPA | NOM -003 ECOL-1997 |
|--|---------------|-----------------------|
| pH | 6-9 | —— |
| DBO ₅ (mg/L) | ≤ 10 | —— |
| Turbiedad (NTU) | ≤ 2 | —— |
| Coliformes Fecales (organismos/100ml) | No detectable | 240 |
| Cloro Residual (mg/L) | 1 | —— |
| Huevos de Helminto (organismos/L) | —— | <1 |

Fuente: (Vargas León, 2015).

“En la **Tabla 15** se muestran algunos parámetros sugeridos en el manual de EPA en zonas no restringidas por las personas como irrigación de campos de golf, parques; lavado de vehículos entre otros; estas a su vez son comparadas con la normatividad mexicana para reúso de agua residual tratada en servicios al público, como los son el pH, DBO (demanda biológica de oxígeno), turbiedad, cloro residual y organismos parasitarios, de la cual se puede desatacar que la normatividad de México no es tan exigente como los lineamientos de EPA” (Vargas León, 2015).

**Tabla 16. Criterio de calidad de agua para riego en uso urbano con restricción.
(EPA)**

| Parámetro | Guías EPA | NOM -003 ECOL-1997 |
|--|-----------|-----------------------|
| pH | 6-9 | —— |
| DBO ₅ (mg/L) | ≤ 30 | —— |
| SST (mg/L) | ≤ 30 | —— |
| Coliformes Fecales (organismos/100ml) | ≤ 200 | <1,000 |
| Cloro Residual (mg/L) | 1 | |
| Coliformes Totales (org/100 ml) | —— | |
| Huevos de Helminto (organismos/L) | —— | <5 |

Fuente: (Vargas León, 2015).

“En la **Tabla 16** se presentan todos los parámetros establecidos en EPA, 2004, para reúso urbano de agua residual, en zonas restringidas y no restringidas en conjunto con los límites recomendados para los componentes de agua reciclada para riego, así como lo exigido en la “Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público” (Vargas León, 2015).

➤ Reúso agrícola

Tabla 17. Criterio de calidad de agua para riego en uso agrícola según la agencia de protección ambiental de estados unidos EPA

| Parámetro | Guías EPA (A) | Parámetro | Guías EPA (B) | Guías EPA (C) |
|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------|
| pH | 6 - 9 | pH | 6 - 9 | 6 - 9 |
| DBO ₅ (mg/L) | ≤ 10 | DBO ₅ (mg/L) | ≤ 30 | ≤ 30 |
| Turbiedad (NTU) | ≤ 2 | TSS (mg/L) | ≤ 30 | ≤ 30 |
| Coliformes Fecales (org/100 ml) | No detectable | Coliformes Fecales (org/100 ml) | ≤ 200 | ≤ 200 |
| Cloro Residual (mg/L) | 1 | Cloro Residual (mg/L) | 1 | 1 |
| Coliformes Totales (org/100 ml) | ----- | Coliformes Totales (org/100 ml) | ----- | ----- |

A Reúso en Agricultura - Cultivos de alimentos no procesados comercialmente.

B Reúso en Agricultura - Cultivos de alimentos comercialmente procesados

C Reúso en Agricultura - Cultivos no alimenticios

Fuente : (Vargas León, 2015).

En la **Tabla 17** se evidencian los parámetros que establece la EPA para reúso en riego agrícola, de acuerdo al tipo de cultivos en que el agua se va a emplear, se definen los valores máximos permisibles.

2.3.3. Organización mundial de la salud OMS

“Las principales guías que regulan el reúso son las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), sobre calidad microbiológica de aguas residuales para irrigación, clasificadas en tres categorías, según sus niveles de parásitos y coliformes fecales, indicadores de la presencia de patógenos (virus, bacterias, protozoos y helmintos) en las aguas residuales domésticas (OMS, 1989) “ (Silva, Torres, & Madera, 2008).

Tabla 18. Guía de la OMS, para el reúso de aguas negras.

| Categoría | Condiciones de reutilización | Grupo expuesto ^b | Nematodos intestinales | Coliformes fecales |
|-----------|---|---|--|-------------------------------|
| | | | (promedio aritmético de huevos/L) ^c | (promedio geométrico/ 100 mL) |
| A | Irrigación de cultivos probablemente consumidos crudos. Campos deportivos, parques públicos. | Agricultores, consumidores, público | $\leq 0,1^d$ | $\leq 10^3$ |
| | | Agricultores, pero no niños <15 años, y comunidades cercanas | ≤ 1 Riego por aspersión | $\leq 10^5$ |
| B | Irrigación de cereales. Cultivos industriales, forrajes, pastos y árboles ^e . | Agricultores, pero no niños <15 años y comunidades cercanas | ≤ 1 Riego por surco | $\leq 10^3$ |
| | | Agricultores, incluyendo niños <15 años, y comunidades cercanas | $\leq 0,1$ Cualquier tipo de riego | $\leq 10^3$ |
| C | Irrigación localizada de cultivos en la categoría B, si no están expuestos los trabajadores y el público. | Ninguno | No aplicable | No aplicable |

Fuente: (Silva et al., 2008).

2.3.4. Decreto 1594 de 1984

Los criterios admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola son los siguientes de acuerdo con el decreto 1594 de 1984.

Tabla 19. Criterios admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola según el decreto 1594 de 1984.

Artículo 40°. Los criterios admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola son los siguientes:

| Referencia | Expresado en | Valor |
|------------|--------------|--------------------|
| Aluminio | Al | 5.0 |
| Arsénico | As | 0.1 |
| Berilio | Be | 0.1 |
| Cadmio | Cd | 0.01 |
| Cinc | Zn | 2.0 |
| Cobalto | Co | 0.05 |
| Cobre | Cu | 0.2 |
| Cromo | Cr+6 | 0.1 |
| Flúor | F | 1.0 |
| Hierro | Fe | 5.0 |
| Litio | Li | 2.5 |
| Manganeso | Mn | 0.2 |
| Molibdeno | Mo | 0.01 |
| Níquel | Ni | 0.2 |
| pH | Unidades | 4.5 - 9.0 unidades |
| Plomo | Pb | 5.0 |
| Selenio | Se | 0.02 |
| Vanadio | V | 0.1 |

Fuente:(Ministerio de agricultura, 1984).

2.3.5. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)

La FAO publicó en 1999 la guía sugerida para aguas tratadas en el reuso agrícola y sus requerimientos de tratamiento.

Tabla 20. Guías sugeridas para aguas tratadas en el reúso agrícola y sus requerimientos de tratamiento.

| Tipos de reúso agrícola | Calidad del agua residual | Opción de tratamiento |
|--|--|---------------------------------------|
| Reúso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente | pH 6,5-8,4 DBO <10 mg·L ⁻¹ <2 UNT <14 NMP coli fecal/100 mL* <1 huevos/L (nematodos intestinales) | Secundario Filtración desinfección |
| Reúso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente | pH 6,5-8,4 <30 mg·L ⁻¹ DBO <30 mg·L ⁻¹ SS <200 NMP coli fecal/100 mL | Secundario desinfección |
| Reúso agrícola en cultivos que no se consumen | pH 6,5-8,4 <30 mg·L ⁻¹ DBO <30 mg·L ⁻¹ SS <200 NMP coli fecal/100 mL | Secundario desinfección |

Fuente: (Silva et al., 2008)

2.3.6. Resolución 631 de 2015

La resolución 631 de 2015 establece los parámetros máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas para emplearse en las siguientes actividades:

Tabla 21. Valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) de las actividades de servicios. Servicios y otras actividades.

| PARÁMETRO | UNIDADES | GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA | TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS | RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS Y SIMILARES | RECICLAJE DE TAMBORES |
|---|---------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------|
| Generales | | | | | |
| pH | Unidades de pH | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L O ₂ | 200,00 | 2.000,00 | 500,00 | 1.000,00 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/L O ₂ | 150,00 | 800,00 | 200,00 | 600,00 |
| Sólidos Suspendedos Totales (SST) | mg/L | 100,00 | 400,00 | 200,00 | 150,00 |

Fuente: (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015).

3. METODOLOGÍA

Se presentan las fases correspondientes para la elaboración del rediseño del prototipo de humedal artificial para la depuración de aguas residuales con plantas ornamentales.

FASE I: se realiza la valoración del humedal que se encuentra en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia, elaborado por estudiantes en el año 2012 y 2018, con el fin de rediseñar el prototipo existente empleando una planta ornamental.

Para esto se revisa inicialmente la metodología de diseño y la estrategia de construcción empleada anteriormente, realizando la valoración de los materiales, dimensiones, funcionamiento y el estado físico en el que se encuentra actualmente. El prototipo anterior se rediseñó con el fin de mejorar la circulación para el reúso del agua tratada.

Para este proyecto se elabora el rediseño del prototipo anterior, implementando plantas ornamentales y realizando los cambios que se consideren pertinentes para su funcionamiento, con el fin de realizar un análisis de eficiencia y compararlo con la obtenida en el año 2018.

FASE II: se realiza la búsqueda de los diferentes prototipos de humedales artificiales desarrollados en otras ciudades del país y del mundo con plantas ornamentales y otros tipos de plantas. Esto se hace, con el fin de revisar los modelos didácticos y la metodología de diseño y construcción aplicada. Con base en las investigaciones que se realizaron se propone el rediseño del prototipo del humedal artificial, incluyendo una fase adicional para determinar la calidad que tiene el agua durante la fase 1 y 2 del sistema, se sembrará la planta ornamental escogida y se desarrollarán las mejoras en el proceso de recirculación empleando geotextil, logrando la depuración del agua obtenida del canal de Cundinamarca.

FASE III: teniendo en cuenta la información obtenida en cada una de las fases, se realizaron los ensayos correspondientes, con base en la normatividad colombiana (Decreto 3930 del 2010), la resolución 1207 de 2014, la agencia de protección ambiental de Estados Unidos EPA y también en los parámetros de la OMS (Organización mundial de la salud) para calidad de agua residual. Se determinará si los datos obtenidos con la planta ornamental cumplen con los estándares de calidad de agua de acuerdo con la normatividad existente, determinando el tipo de uso que se le dará a estas aguas tratadas.

4. DISEÑO METODOLÓGICO Y CRONOGRAMA

A continuación, se presentan las fases de metodología y cronograma que permitieron realizar el rediseño del humedal artificial en los tiempos planteados.

4.1. DISEÑO METODOLÓGICO

Tabla 22. Fases empleadas en la metodología.

| | | | | |
|-----------------------------------|--|---------------|--|---|
| FASES DE METODOLOGIA Y CRONOGRAMA | OBJETIVO GENERAL: realizar el rediseño del prototipo de humedal artificial (laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia), que permita analizar la eficiencia en el tratamiento del agua residual, implementando una fase más al proceso de tratamiento de aguas existente, con el fin de optimizar los resultados del análisis de calidad de agua, esta irá antes de la fase actual, con el fin de comparar la calidad del agua cuando pasa de la fase 1 a la 2, utilizando plantas ornamentales y mejorando el sistema de recirculación empleando geotextil. | | | |
| | ACTIVIDADES | SEMANA | PROCEDIMIENTOS | PRODUCTOS |
| | OBJETIVO ESPECIFICO 1: realizar la valoración del estado actual del humedal artificial que se encuentra en el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia. | | | |
| | Realizar valoración del prototipo existente. | Semana 1 | Se realizó la valoración del humedal que se encuentra en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia donde se revisara la metodología de diseño y la estrategia de construcción empleada anteriormente con el fin de determinar su funcionamiento, materiales y estado en el que se encuentra actualmente. | Conocimiento del funcionamiento |
| | Realizar el registro Fotográfico | Semana 1 | Se realizó un registro fotográfico inicial del estado actual en el que se encuentra el prototipo del humedal, | Registro fotográfico |
| | Realizar una descripción | Semana 1 | Se realizó un diagnóstico del estado actual en el que se encuentra el prototipo con el fin de determinar los materiales que se deban cambiar y de las mejoras correspondientes que se deban realizar al sistema. | Diagnóstico y/o valoración |
| | Investigaciones | Semana 1 | Se realizan las respectivas investigaciones a nivel mundial del funcionamiento de los humedales artificiales y el por qué son construidos. | Artículos de investigación-conocimiento |

Continúa Tabla 22

| FASES DE METODOLOGIA Y CRONOGRAMA | OBJETIVO ESPECÍFICO 2: hacer el rediseño del humedal y construirlo bajo los parámetros propuestos, teniendo en cuenta la inclusión de plantas ornamentales, mejorando su recirculación por medio de una fase más al sistema de tratamiento anterior y seleccionando aguas residuales con altos niveles de contaminación. | | | |
|-----------------------------------|---|----------------------|--|--|
| | ACTIVIDADES | SEMANA | PROCEDIMIENTOS | PRODUCTOS |
| | Realizar el diseño de la fase 1 con plantas ornamentales, al sistema existente | Semana 2 | Se realizó el diseño de una fase más al proceso de tratamiento de aguas existente con el fin de optimizar los resultados del análisis de calidad de agua, esta fase se encuentra localizada antes de la fase actual, con el fin de comparar la calidad del agua cuando pasa de la 1 a la fase 2. | Propuesta de diseño |
| | Mantenimiento y mejora del sistema existente | Semana 2 | Para mejorar el sistema, se realiza un mantenimiento general y en la circulación que tiene actualmente el humedal, se instaló geotextil para impedir el paso de sedimentos por las mangueras, mejorando el sistema de filtración y de recirculación para que sea sostenible. | Registro fotográfico |
| | Implementación de plantas ornamentales | Semana 2 y 3 | Se realizó la implementación de plantas ornamentales que formaran una barrera en las dos fases obligando a que el agua pase por medio de sus raíces. | Registro fotográfico |
| | Realizar una estabilización del sistema | Semana 3 | Se realizaron pruebas remoto con agua lluvia, con el fin de estabilizar el sistema y realizar los ajustes necesarios para su adecuado funcionamiento y así poder empezar a utilizarlo en la purificación de aguas altamente contaminadas. | Registro fotográfico |
| | Realizar Control y ensayos de muestras obtenidas | Semana 4 – semana 13 | Se realiza toma de muestras a la entrada del sistema, luego a los 5 días y después a los 21 días, en cada una de las fases, para determinar la eficiencia que tiene el sistema en la depuración de sustancias contaminantes. | Registro fotográfico, ensayos de laboratorio |

Continúa Tabla 22

| FASES DE METODOLOGIA Y CRONOGRAMA | Objetivo específico 3: determinar los parámetros de calidad de agua empleando la planta ornamental escogida y compararlos con los resultados obtenidos de una planta subacuática que fue usada en el prototipo realizado en el año 2018. | | | |
|-----------------------------------|---|------------------|--|---|
| | ACTIVIDADES | Semana | PROCEDIMIENTOS | PRODUCTOS |
| | Resultados obtenidos | Semana 13-14 | Se realiza la comparación de eficiencia del sistema de depuración de acuerdo con los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio del año 20149 a los resultados del año 2019, | Cuadro comparativo con anexos |
| | Investigación de la normatividad | Semana 14 | Teniendo en cuenta la información obtenida en las fases anteriores y basándonos en la normatividad colombiana (Decreto 3930 del 2010) y también en los parámetros de la OMS (Organización mundial de la salud) para calidad de agua. Se determina si los datos obtenidos con la planta ornamental cumplen con los estándares de calidad de agua de acuerdo a la normatividad existente, determinando el tipo de uso que se le dará a estas aguas tratadas. | (norma Resolución 330 de 2017-Decreto 3930 del 2010)- parámetros de la OMS (Organización mundial de la salud) |
| | Entrega de informe y diseño | Semana 1 a la 15 | Se elabora trabajo final. | Informe Final |

Fuente propia.

4.2. CRONOGRAMA

En la **Tabla 23** se registran los días en los que se realizó el control, monitoreo y ensayos de laboratorio a las dos muestras de agua.

Tabla 23. Cronograma de ensayos

| CRONOGRAMA Y PRUEBAS REALIZADAS | | | | | | |
|--|------------|---------|------------|--------|------------|--------|
| DETALLE | ENTRADA | 2 HORAS | 5 DIAS | | 21 DIAS | |
| | | | FASE I | FASE 2 | FASE I | FASE 2 |
| MUESTRA 1 DE AGUA CANAL DE CUNDINAMARCA | 17/08/2019 | | 22/08/2019 | | 07/09/2019 | |
| MUESTRA 2 DE AGUA CANAL DE CUNDINAMARCA | 07/09/2019 | | 12/09/2019 | | 28/09/2019 | |
| PH | X | X | X | X | X | X |
| CONDUCTIVIDAD (Ms/Cm) | X | X | X | X | X | X |
| RESISTIVIDAD (Ω. Cm) | X | X | X | X | X | X |
| SALINIDAD (sal) | X | X | X | X | X | X |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) mg/L | X | X | X | X | X | X |
| TEMPERATURA (°C) | X | X | X | X | X | X |
| TURBIEDAD (NTU) | X | X | X | X | X | X |
| COLOR (Ptco) platino cobalto | X | X | X | X | X | X |
| DUREZA TOTAL (m/l) | X | X | X | X | X | X |
| DUREZA Calcio | X | X | X | X | X | X |
| DUREZA Magnesio | X | X | X | X | X | X |
| ALCALINIDAD (m/litro de CaCo3) | X | X | X | X | X | X |
| HIERRO | X | O | O | O | O | X |
| DBO-5 (DEMANADA BIOLOGICA DE OXIGENO) mgO2/L | X | - | - | - | - | X |
| DQO (DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO) mgO2/L | X | - | - | - | - | X |

Observaciones:

X Se realiza el ensayo
- No se realiza el ensayo
O Se realiza depende del resultado inicial

Fuente: Propia

5. DIAGNÓSTICO PROCESO DE DISEÑO MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL 2012 y 2018

En este capítulo se realiza la valoración del diseño del prototipo humedal artificial realizado por Mauricio Charry Agudelo y Nelson Fabián Achipiz del semillero Eco Civil en el año 2012, se reconoce el método empleado para realizar el dimensionamiento del humedal, así como el lecho y las plantas empleadas (junco común) para realizar el proceso de remoción. Se realiza la revisión del rediseño implementado por María Morales y Leidy Castellanos en el año 2018, se identifica la mejora que realizaron en el proceso de recirculación del humedal artificial.

5.1. DISEÑO MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL 2012

El trabajo de investigación del modelo para simular el funcionamiento en un humedal en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia fue desarrollado por Mauricio Charry Agudelo y Nelson Fabián Achipiz, en el semillero de investigación Eco Civil.

Se realizó el montaje a escala, mediante cálculos y ensayos de laboratorio para determinar los parámetros de remoción de los agentes contaminantes en el humedal artificial.

Para el diseño del modelo, los estudiantes de la Universidad utilizan el método de vaciado llenado, utilizan un recipiente plástico de 66 cm de longitud, 31 cm de altura y 40 cm de anchura, estas dimensiones las determinaron mediante cálculos con la ecuación de REED como se muestra en la **Tabla 24**.

Tabla 24. Tabla dinámica que permite obtener los valores de dimensiones dependiendo de las variables que se tengan para el diseño.

| DISEÑO HIDRAULICO MODELO HUMEDAL SUBSUPERFICIAL | | | |
|--|-----------|---------------------------------|-----------|
| AREA | Base | | 0.66 |
| | Largo | | 0.4 |
| AREA= | 0.264 m2 | | |
| | w(m) | 0.400 | 0.1001206 |
| | y(m) | 0.250 | 4 |
| | As (m2) | 0.264 | |
| | m(m) | 0.050 | |
| | Ks | 0.333 | |
| | Q (l/dia) | 0.002 | |
| $W = \frac{1}{y} \left[\frac{(Q)(A_s)}{(m)(k_s)} \right]^{0.5} = 0.4004824$ | | | |
| | W | Ancho | |
| | h | Altura | |
| | Ks | Conductividad Hidraulica | |
| | Q | Caudal | |
| | m | Pendiente en el fondo del lecho | |
| DONDE W (Ancho del recipiente, es la variable a calcular) | | | |

Fuente: (Charry & Achipiz, 2012).

Para el lecho del humedal se coloca la capa de grava de 3 a 5 cm distribuida uniformemente y luego suficiente cantidad de tierra tomada del humedal la Conejera para sembrar la planta subacuática Junco que se tomó del humedal. Siguiendo a esto, para adaptar la planta a su nuevo hábitat, se agregó agua lluvia para luego de ocho días, agregar el agua contaminada, esto se muestra en la **Ilustración 23**.

Ilustración 23. Modelo con fango o tierra propia de su ecosistema, junco debidamente plantado y confinado.



Fuente: (Charry & Achipiz, 2012).

El agua residual la tomaron del Canal del río arzobispo, posteriormente realiza la toma de las muestras a analizar. Primero realizan un proceso de recirculación manual para que el agua adquiera condiciones dinámicas y toman la muestra por medio de una válvula que instalaron en uno de los extremos del humedal artificial. Miden los parámetros de calidad iniciales de calidad de agua que para este caso fueron: pH, conductividad, resistividad, sólidos en suspensión, salinidad, temperatura, oxígeno, turbiedad, color aparente, dureza, alcalinidad y demanda biológica de oxígeno (DBO₅).


Tabla 25. Resultados de laboratorio prototipo humedal 2012.


| RESULTADOS DE PRUEBAS Y ANALISIS DE LABORATORIO | | | |
|---|-------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| NOMBRE DE LA PRUEBA | MUESTRA CONDICIONES INICIALES | MUESTRA TRATADA | MUESTRA TRATADA CON RECIRCULACION |
| PH | 7,3 | 5,7 | 4,6 |
| CONDUCTIVIDAD (µs/cm) | 72,4 | 340 | 340 |
| RESISTIBIDAD (KΩ/cm) | 13,77 | 2,9 | 2,9 |
| SOLIDOS EN SUSPENSION (mg/l) | 38,7 | 181 | 181 |
| SALINIDAD | 0 | 0,2 | 0,2 |
| TEMPERATURA °C | 17,1 | 15,8 | 15,8 |
| OXIGENO (mg/l) | 0,77 | 0,78 | 0,78 |
| PORCENTAJE DE OXIGENO (%) | 10,8 | 10,7 | 10,6 |
| TURBIEDAD (NTU) | 31,2 | 2,64 | 16,4 |
| COLOR APARENTE (Unid. De PtCo) | 338 | 25 | 107 |
| DUREZA (mg/l CaCO ₃) | 3,08 | 3,08 | 2,95 |
| ALCALINIDAD (mg/l CaCO ₃) | 32 | 37 | 27 |
| DBO ₅ | 32,7 | 2,65 | NO APLICA |
| | | | |

Fuente: (Charry & Achipiz, 2012).

En la **Tabla 25** se muestran los resultados de las pruebas elaboradas en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia, observando que los valores de los parámetros de la muestra tratada con recirculación manual tienden a disminuir, estos son: pH, porcentaje de oxígeno, dureza cálcica, alcalinidad. En los resultados obtenidos de DBO₅ en la muestra tratada también se obtiene una eficiencia de remoción de 92%, esto es un resultado muy favorable en remoción de materia orgánica.

Tabla 26. Resultados parámetro DBO₅ inicial. Humedal artificial 2012.

| <p>FUNDACION UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA SECCIÓN DE LABORATORIOS LABORATORIO DE CALIDAD Y ANÁLISIS</p> <p>MUESTRA: AGUA LLUVIA Y RESIDUAL PROCEDENCIA: CANAL ARZOBISPO A LA ALTURA DE LA CALLE 45 ANÁLISIS: DBO₅ MÉTODO: MANOMÉTRICO FECHA DE INGRESO: 22/10/2102 FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS: 31/10/2012</p>  | | | | | |
|---|----|-----------------------|----------|------------|------------|
| MUESTRA | N° | DBO ₅ mg/l | PROMEDIO | D.E | C.V |
| 1 | 1 | 30 | 30,1 | 0,14142136 | 0,00469838 |
| REPLICA | 1 | 30,2 | | | |
| | 2 | 31,9 | 31,9 | 0 | 0 |
| REPLICA | 2 | 31,9 | | | |
| | 3 | 32,8 | 32 | 1,13137085 | 0,03535534 |
| REPLICA | 3 | 31,2 | | | |
| | 4 | 34,2 | 34,3 | 0,14142136 | 0,00412307 |
| REPLICA | 4 | 34,4 | | | |
| PATRON GLUCOSA-ACIDO GLUTAMICO | 5 | 181 | 181 | 0 | 0 |

| <p>FUNDACION UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA SECCIÓN DE LABORATORIOS LABORATORIO DE CALIDAD Y ANÁLISIS</p> <p>MUESTRA: AGUA MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL PROCEDENCIA: CANAL ARZOBISPO A LA ALTURA DE LA CALLE 45 ANÁLISIS: DBO₅ MÉTODO: MANOMÉTRICO FECHA DE INGRESO: 29/10/2012 FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS: 8/11/2012</p>  | | | | | |
|--|----|-----------------------|----------|------------|------------|
| MUESTRA | N° | DBO ₅ mg/l | PROMEDIO | D.E | C.V |
| 1 | 1 | 4,9 | 6 | 1,55563492 | 0,25927249 |
| REPLICA | 1 | 7,1 | | | |
| | 2 | 3 | 7,5 | 6,36396103 | 0,84852814 |
| REPLICA | 2 | 12 | | | |
| | 3 | 2,5 | 2,85 | 0,21213203 | 0,08004982 |
| REPLICA | 3 | 2,8 | | | |
| | 4 | 1 | 1,55 | 0,77781746 | 0,50181772 |
| REPLICA | 4 | 2,1 | | | |
| PATRON GLUCOSA-ACIDO GLUTAMICO | 5 | 181 | 181 | 0 | 0 |
| | 5 | 181 | | | |

Fuente:(Charry & Achipiz, 2012).

La **Tabla 26** muestra los resultados iniciales obtenidos de la carga contaminante DBO_5 , se monitoreó una muestra y se le hicieron 4 réplicas, la carga contaminante DBO_5 se presentó de forma ascendente, siendo la réplica 1 igual a 30 mg/l, la réplica 4 fue de 34,2 mg/L, luego obtienen la carga contaminante DBO_5 a los 7 días,

Analizando los resultados de las réplicas, se puede afirmar que en la réplica que se mostró mayor remoción de material contaminante DBO_5 fue en la 4, en esta la eficiencia fue de 97,07%.

Este trabajo de grado permite comprender el dimensionamiento de un humedal artificial y a su vez entender con resultados la eficiencia en la remoción de parámetros como alcalinidad, porcentaje de oxígeno y remoción de materia orgánica DBO_5 , al realizar recirculación manual.

El montaje de recirculación se realiza manualmente como se muestra en la **Ilustración 24**, esto causa que el humedal al no ser operado por alguna persona no tenga el mismo funcionamiento inicial, y así ocasionando que las plantas se mueran por falta de agua y que el humedal quede en total deterioro.

Ilustración 24. Proceso de recirculación de agua tratada en prototipo humedal artificial 2012



Fuente:(Charry & Achipiz, 2012).

5.2. REDISEÑO MODELO HUMEDAL ARTIFICIAL 2018

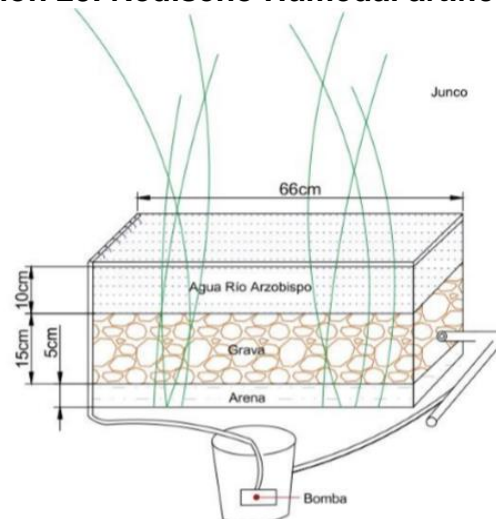
El trabajo de rediseño humedal artificial para depuración de aguas residuales y reúso: modelo didáctico laboratorio de recursos hídricos universidad católica de Colombia, fue desarrollado por María Estefany Morales Caicedo y Leidy Leticia Castellanos Rodríguez, en el semillero EcoCivil.

Se elabora el rediseño de un humedal artificial implementado en el año 2012 por estudiantes de la Universidad, con el fin de que se pueda mejorar la calidad del agua residual, donde se determinará un reúso del agua para riego de plantas, así de esta manera generar un menor impacto ambiental.

Para el rediseño se utiliza el mismo recipiente del año 2012, el cual se lavó y se desinfectó porque no se encontraba en condiciones óptimas, luego se utiliza grava y arena que tiene como característica la permeabilidad para permitir el paso del agua. Posteriormente se utiliza el junco que fue extraído del humedal natural Córdoba, ubicado en Bogotá.

Se utilizó agua del río arzobispo y como medio filtrante para la depuración de agua residual se empleó antracita, la cual posee propiedades de absorción y mejoramiento de la turbiedad en la **Ilustración 25**, se presenta la propuesta que se hizo para la recirculación, empleando una bomba pecera de 5 watts, esta se colocó en un recipiente de 25 cm de alto * 31 cm de ancho.

Ilustración 25. Rediseño Humedal artificial 2018.



Fuente: (Maria & Castellanos, 2018).

Ilustración 26. Detalle de rediseño humedal artificial 2018.



Fuente: (Maria & Castellanos, 2018).

En la **Ilustración 26**, se presenta en detalle el rediseño realizado, se empleó la planta subacuática junco común y para la recirculación se instalaron 2 mangueras, estas se

encuentran unidas a una tubería que permite la entrada y salida de agua en el humedal por medio de la bomba pecera, que impulsa el agua contenida en el balde.

Para realizar una comparación de resultados obtenidos, se recolectan 2 muestras para 2 prototipos, en el prototipo 1 se utiliza como medio filtrante grava y arena. En el prototipo 2, se usa como medio filtrante antracita, grava y arena.

En la **Tabla 27** se presentan los resultados de los parámetros medidos para la muestra de prototipo 1 y 2.

Tabla 27. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 1 y 2.

Tabla 14. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 1.

| Parámetro | Unidades | Lab. 1 Entrada | Lab. 2 5 días | Lab. 3 21 días |
|---------------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| pH | Adimensional | 7,55 | 7,73 | 6,93 |
| Conductividad: | μs/cm | 285,00 | 228,00 | 180,40 |
| Resistividad | kΩ/cm | 3,50 | 4,39 | 5,46 |
| Turbiedad | NTU | 26,00 | 2,00 | 4,00 |
| Color | PtCo | 273,00 | 29,00 | 27,00 |
| Salinidad | Sal | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| %O | % | 0,00 | 10,00 | 0,00 |
| O | mg/l | 0,60 | 0,70 | 0,00 |
| Sólidos Suspendidos | mg/l | 152,00 | 121,00 | 98,40 |
| Temperatura | °C | 17,00 | 19,50 | 17,20 |
| Alcalinidad | CaCO ₃ /l | 75,00 | 39,00 | 38,00 |

FUENTE: (fuente propia)

Tabla 15. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 2.

| Parámetro | Unidades | Lab. 1 Entrada | Lab. 2 5 días | Lab. 3 21 días |
|---------------------|-------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| pH | Adimensional | 7,06 | 6,93 | 7,17 |
| Conductividad: | μs/cm | 127,70 | 247,00 | 325,00 |
| Resistividad | kΩ/cm | 7,83 | 4,07 | 3,07 |
| Turbiedad | NTU | 10,00 | 5,00 | 0,99 |
| Color | PtCo | 133,00 | 60,00 | 31,00 |
| Salinidad | Sal | 0,10 | 0,10 | 0,20 |
| %O | % | 22,00 | 20,00 | 34,00 |
| O | mg/l | 1,60 | 1,40 | 2,40 |
| Sólidos Suspendidos | mg/l | 67,90 | 131,00 | 173,00 |
| Temperatura | °C | 15,30 | 18,40 | 17,10 |
| Alcalinidad | CaCO ₃ /l | 33,00 | 57,00 | 33,00 |
| Nitritos | mg/l NO ₂ -N | 0,065 | 0,020 | 0,019 |

FUENTE: (fuente propia)

Fuente: (Maria & Castellanos, 2018).

Los resultados de la **Tabla 27**, indican que el prototipo No.2 con medio filtrante antracita, grava y arena mejora los siguientes parámetros: pH, resistividad, turbiedad, alcalinidad, esto indica que la implementación de antracita en el medio filtrante es eficiente en la disminución de estos parámetros.

La cantidad y porcentaje de oxígeno dieron mayores, esto es favorable porque permite que la planta remueva mayor cantidad de materia orgánica. Se evidencia que el agua de entrada en el prototipo No.1 tenía los parámetros de pH, conductividad, turbiedad color, sólidos suspendidos, temperatura y alcalinidad más altos con respecto al agua de entrada en el prototipo No.2.

Al realizar 2 muestreos con dos medios filtrantes diferentes, se puede identificar la brecha que existe en la calidad de agua de estrada en cada muestreo y a su vez reconocer la ventaja de emplear antracita en el medio filtrante del humedal artificial.

Al comparar los resultados obtenidos con la normatividad vigente, se estableció que el agua obtenida es apropiada para emplearla en riego de acuerdo con la Resolución 1207 del 2014 Aguas Residuales Tratadas y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Este rediseño mejoró con respecto al prototipo realizado en el año 2012, de acuerdo con la **Tabla 28**, porque se obtuvieron mejores resultados en los siguientes parámetros: pH, turbiedad, alcalinidad, resistividad, conductividad, salinidad, sólidos disueltos, porcentaje y cantidad de oxígeno disuelto.

Tabla 28. Comparación resultados modelo 2012 (izquierda) vs modelo 2018 (derecha).

| RESULTADOS DE PRUEBAS Y ANALISIS DE LABORATORIO | | | |
|---|-------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| NOMBRE DE LA PRUEBA | MUESTRA CONDICIONES INICIALES | MUESTRA TRATADA | MUESTRA TRATADA CON RECIRCULACION |
| PH | 7,3 | 5,7 | 4,6 |
| CONDUCTIVIDAD (µs/cm) | 72,4 | 340 | 340 |
| RESISTIVIDAD (KΩ/cm) | 13,77 | 2,9 | 2,9 |
| SOLIDOS EN SUSPENSION (mg/l) | 38,7 | 181 | 181 |
| SALINIDAD | 0 | 0,2 | 0,2 |
| TEMPERATURA °C | 17,1 | 15,8 | 15,8 |
| OXIGENO (mg/l) | 0,77 | 0,78 | 0,78 |
| PORCENTAJE DE OXIGENO (%) | 10,8 | 10,7 | 10,6 |
| TURBIEDAD (NTU) | 31,2 | 2,64 | 16,4 |
| COLOR APARENTE (Unid. De PtCo) | 338 | 25 | 107 |
| DUREZA (mg/l CaCO ₃) | 3,08 | 3,08 | 2,95 |
| ALCALINIDAD (mg/l CaCO ₃) | 32 | 37 | 27 |
| DBO ₅ | 32,7 | 2,65 | NO APLICA |

Tabla 15. Resultados laboratorio humedal artificial prototipo 2.

| Parámetro | Unidades | Lab. 1 Entrada | Lab. 2 5 días | Lab. 3 21 días |
|---------------------|-------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| pH | Adimensional | 7,06 | 6,93 | 7,17 |
| Conductividad: | µs/cm | 127,70 | 247,00 | 325,00 |
| Resistividad | kΩ/cm | 7,83 | 4,07 | 3,07 |
| Turbiedad | NTU | 10,00 | 5,00 | 0,99 |
| Color | PtCo | 133,00 | 60,00 | 31,00 |
| Salinidad | Sal | 0,10 | 0,10 | 0,20 |
| %O | % | 22,00 | 20,00 | 34,00 |
| O | mg/l | 1,60 | 1,40 | 2,40 |
| Solidos Suspendidos | mg/l | 67,90 | 131,00 | 173,00 |
| Temperatura | °C | 15,30 | 18,40 | 17,10 |
| Alcalinidad | CaCO ₃ /l | 33,00 | 57,00 | 33,00 |
| Nitritos | mg/l NO ₂ -N | 0,065 | 0,020 | 0,019 |

FUENTE: (fuente propia)

En la **Ilustración 27** se presenta el registro fotográfico del rediseño del humeda artificial en el año 2018, elaborado por Maria Morales y Leidy Castellanos, estudiantes de la Universidad Católica. Como se muestra en la **Ilustración 27** se encontraron las siguientes falencias en el rediseño del prototipo del humedal artificial :

1. Se evidencia que la recirculación se realiza a través de unas mangueras que se encuentran tapadas por residuos.

2. En el balde se encuentra la bomba que recircula el agua según la **Ilustración 27**, donde se identifican residuos de material de grava, arena y antracita del humedal, lo cual puede generar que los resultados tengan un error en la depuración.
3. El humedal no cuenta con un sistema eléctrico que controle el funcionamiento óptimo en este, por consiguiente, cuando exista ausencia de agua en el sistema, la bomba puede dejar de funcionar correctamente generando que el humedal no funcione y las plantas se deterioren por la pérdida de agua.
4. El balde es un elemento que puede obstaculizar la entrada al laboratorio de aguas y que fácilmente puede ser derribado por algún estudiante.

Ilustración 27. Estado humedal artificial año 2018.



Fuente propia.

6. PROCESO DE REDISEÑO Y CONSTRUCCION DEL HUMEDAL ARTIFICIAL EMPLEADO PLANTAS ORNAMENTALES

A continuación, se evidencia el procedimiento que se tuvo para realizar el rediseño del humedal artificial; así mismo, se describen los materiales empleados para el mejoramiento de este.

6.1. MATERIALES UTILIZADOS

- **Recipientes:** se propuso instalar una fase adicional a la existente con el fin de comparar los resultados de calidad de agua de una fase a la otra, para ello se implementó un recipiente plástico con las siguientes medidas: 32cm (largo), 16 cm (alto) y 21 cm (ancho), a esta fase la denominamos **Fase 1**, el diseño se presenta en la
- **Ilustración 28.Fase 1 (fase añadida) rediseño humedal artificial.**

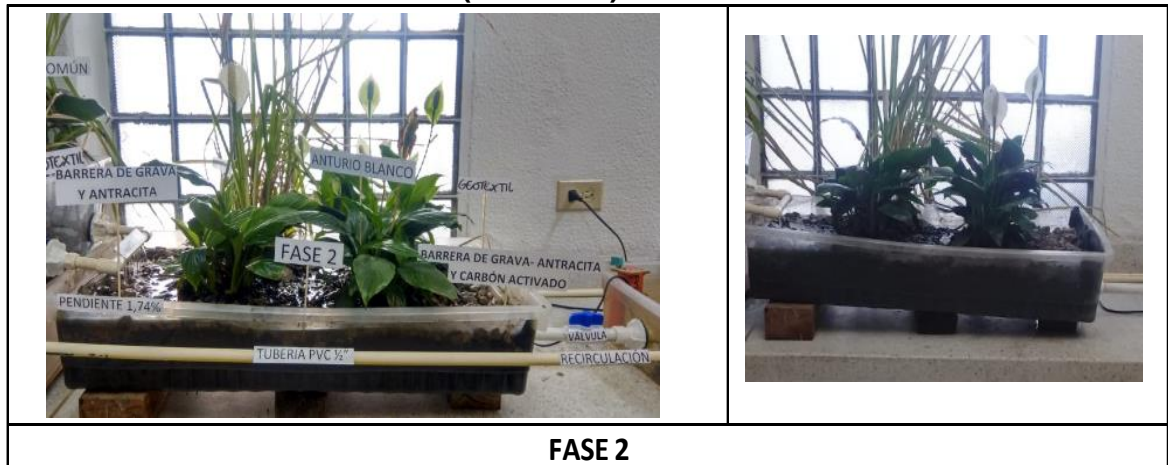
Ilustración 28.Fase 1 (fase añadida) rediseño humedal artificial.



Fuente propia.

- Se realizó uso del recipiente que implementaron los estudiantes Mauricio Charry Agudelo, Nelson Fabián Achipiz, María Morales y Leidy Castellanos en el diseño del humedal artificial. Este recipiente tiene las siguientes medidas: 76 cm (largo), 35 cm (ancho) y 14 cm (alto). Este es el recipiente más grande del sistema y es denominado **Fase 2**.

Ilustración 29. Fase 2 (existente) rediseño humedal artificial.



Fuente propia.

- Para suministrar agua en el sistema, se implementó otro recipiente en el cual se instaló la bomba eléctrica y el interruptor para controlar el funcionamiento de la bomba de acuerdo al nivel de agua, este se denomina tanque.

Ilustración 30. Tanque rediseño humedal artificial.



Fuente propia.

- **Plantas ornamentales (Anturio blanco):** la planta ornamental que se escogió para realizar la depuración, en conjunto con la planta junco común en el humedal artificial fue el Anturio de flor blanca. Su nombre científico es *Anthurium andreaeanum*, esta planta presenta flores exóticas de múltiples tonalidades como el rojo, el rosado, el blanco. Esta es una planta de interior comúnmente utilizada para la decoración por su belleza y fácil cultivo.

Ilustración 31. Planta ornamental empleada.



Fuente propia.

- **Tubería Pavco de ½” para agua fría:** Se emplearon 24 cm de tubería para agua fría y se instaló una válvula de bola en PVC para controlar el flujo de agua de la Fase 1 a la Fase 2.

Ilustración 32. Tubería PVC agua fría.



Fuente propia.

- **Tubería Pavco de ½” para agua caliente:** para el sistema de recirculación se instalaron aproximadamente 1 ½m de tubería de agua caliente de ½ “.

Ilustración 33. Tubería PVC agua caliente.



Fuente propia.

- **Malla Geotextil:** como alternativa para evitar en taponamiento de manguera y tuberías se empleó malla geotextil, esta cumple la función de filtro para retener las partículas sólidas más grandes que contiene el humedal. Esta se colocó a la salida de la Fase 1 y 2.

Ilustración 34. Malla geotextil.



Fuente propia.

- **Grava:** Para la Fase 2 se usó la grava que se encontraba en el humedal y que emplearon estudiantes en la tesis pasada, para la Fase 1 se trajo grava del laboratorio de suelos. Se rediseñó la forma de distribución del lecho filtrante en cada fase, con el fin de permitir que el agua contaminada pase por todo el material

filtrante (antracita y grava) y así retener mayor cantidad de partículas, para ello se colocaron barreras de grava y antracita de 15 cm, 10 cm y 15 cm en la **fase 2**. Como se muestra en la **Ilustración 35**, en la **fase 1** se colocaron 2 barreras de grava y antracita de 7 cm.

Ilustración 35. Barreras de grava y antracita.



Fuente propia.

- **Antracita:** como medio de filtración para la clarificación del agua residual, se emplea la antracita, la cual es un carbón mineral, de color negro, brillante, con gran dureza y que presenta hasta un 95% de contenido en carbono. Esta permite que se retenga el material suspendido en el humedal.

Este medio filtrante permite mayor flujo, menos caída de presión y un mejor retro lavado.

Ilustración 36. Antracita empleada.



Fuente propia.

- **Carbón Activado:** para atrapar los compuestos principalmente orgánicos y retener aceites, detergentes y compuestos que producen color en el agua residual

del Canal de Cundinamarca, se añade carbón activado en la barrera de 15 cm de la salida de la **fase 2** del humedal artificial, con el propósito de mejorar la apariencia del agua residual en su color y olor.

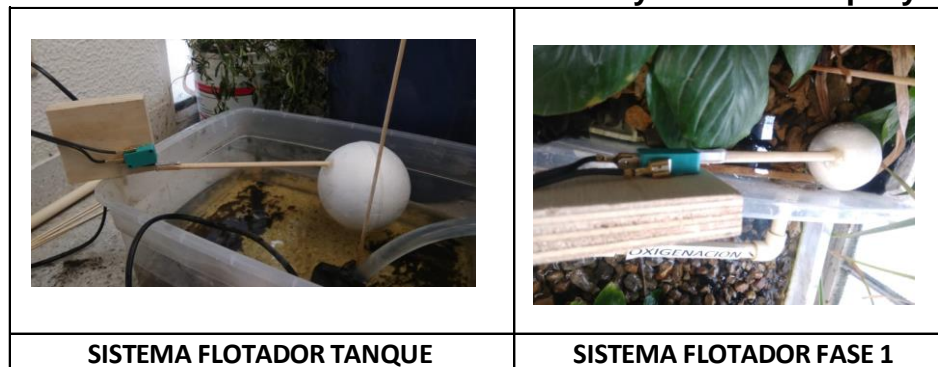
Ilustración 37. Carbón activado en fase 2.



Fuente propia.

- **Flotador de llenado y vaciado para tanque y Fase 1:** En el tanque se instaló un sistema tipo flotador, consta de una bola de icopor que activa o desactiva un interruptor que va conectado a la bomba. Esto funciona de acuerdo al nivel de agua que presente, cuando disminuya el nivel de agua la bomba se apagará y se activará cuando el tanque este lleno. En la fase 1 se instaló el mismo sistema, pero este solo apagará la bomba cuando el agua en este recipiente se rebose.

Ilustración 38. Sistema flotador llenado y vaciado tanque y fase 1



Fuente propia.

- **Agua Residual canal de Cundinamarca:** para analizar la eficiencia del humedal en la remoción de materia orgánica, se recolectó en dos ocasiones agua residual proveniente del Canal de Cundinamarca, el cual tiene aproximadamente 8 km de longitud y nace en el límite entre Bogotá y el municipio de Soacha (Cundinamarca), recoge las aguas lluvias de las localidades de Bosa, Kennedy y Fontibón y desemboca en el río Fucha. En la **Ilustración 39** se presenta la recolección de las muestras de agua en un envase de 15 litros.

Ilustración 39. Recolección muestra canal de Cundinamarca.

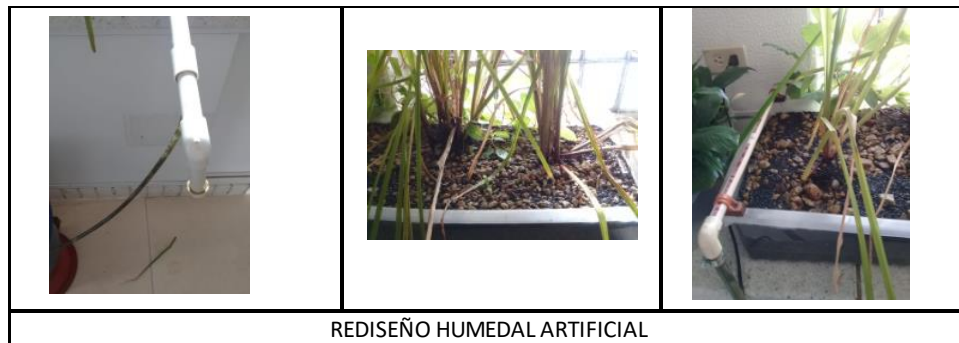


Fuente propia.

6.1.1. PROCESO CONSTRUCTIVO

En la **Ilustración 40** se evidencia el humedal artificial con juncos y con un sistema de recirculación con mangueras y bomba planteado en el año 2018 por estudiantes del Semillero Eco Civil.

Ilustración 40. Humedal artificial año 2018.



Fuente propia.

Se procede a desocupar el humedal separando los juncos de la grava, se dejan en un recipiente cuidando que la raíz de estos salga completa sin causar algún daño a la planta como se muestra en la **Ilustración 41**.

Ilustración 41. Retiro de juncos en el humedal.



Fuente propia.

La grava presente en el humedal se deposita en un balde como se muestra en la **Ilustración 42**, se deja el recipiente totalmente desocupado para proceder con su limpieza.

Ilustración 42. Retiro de grava en el humedal.



Fuente propia.

Posteriormente se realiza el lavado de la “fase 2” con jabón antibacterial para remover el color anaranjado presente en todo el recipiente como se muestra en la **Ilustración 43**.

Ilustración 43. Lavado y desinfección recipiente fase 2.



Fuente propia.

Una vez se tiene limpio el recipiente de la fase 2, se procede a realizar el montaje como se muestra en la **Ilustración 44** colocando malla geotextil a la salida, luego se coloca tierra y abono para las plantas (Anturio blanco y Junco común).

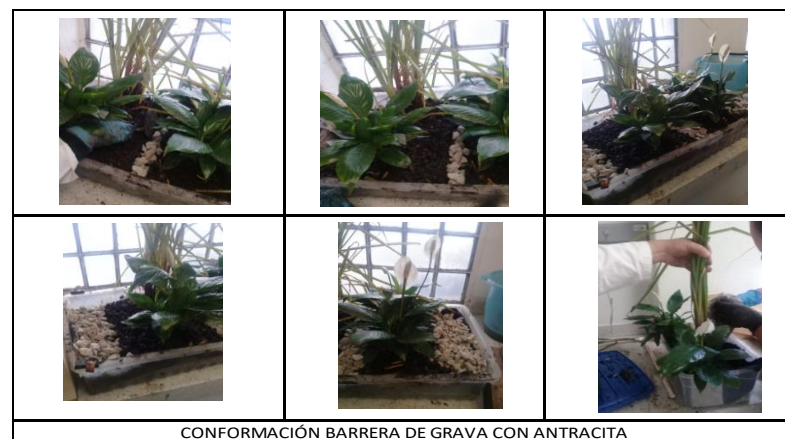
Ilustración 44.Instalación malla geotextil, tierra, abono y plantas.



Fuente propia.

Se conforman las barreras en la fase 2 como se muestra en la **Ilustración 45**, para ello se coloca una barrera de grava con antracita y luego una barrera de tierra y abono, en la que se coloca la planta ornamental Anturio blanco y el junco común. Nuevamente se coloca una barrera de grava con antracita y otra barrera de plantas, al final se coloca una barrera de grava, antracita y carbón activado para mejorar la absorción de material químico y biológico en el sistema. También se colocan palos de madera debajo del recipiente para generar una leve pendiente de 1,74% con el fin de evitar que el agua quede depositada en algún punto.

Ilustración 45.Montaje fase 2.



Fuente propia.

Se realiza el montaje de la Fase 1 de la misma manera que en la otra fase, exceptuando la adición de carbón activado. La fase 1 se coloca sobre una mesa hecha con las siguientes medidas: 24 cm (alto), 25 cm (largo) y 45,2 cm (ancho) .

La Fase 1 tiene una leve pendiente de 2% para generar un efecto cascada en el sistema y permitir que se genere mayor cantidad de oxígeno y a su vez mayor remoción de materia orgánica.

Ilustración 46. Montaje fase 1.



Fuente propia.

Finalmente se realiza el proceso de recirculación en el sistema empleando aproximadamente 2 metros de tubería PAVCO de $\frac{1}{2}$ " para agua caliente, se coloca el tubo que emplearon en el rediseño estudiantes del año 2018, este tubo tiene 45 cm de longitud y 19 agujeros para permitir el paso del agua a la fase 1.

Luego se coloca en la parte inferior del recipiente de la fase 1 un tubo (Tubería PAVCO de $\frac{1}{2}$ " para agua caliente) de 21 cm de largo con 12 agujeros para permitir el paso del agua a la fase 2 como se muestra en la **Ilustración 47**, generando un efecto cascada para que haya mayor remoción de materia orgánica en el sistema.

Ilustración 47. Realización de orificios para Fase 1.



Fuente propia.

Ilustración 48. Montaje Final



Fuente: propia.

En la **Ilustración 48** , se presenta el montaje final del rediseño, adicionando la fase 1, el tanque, la malla geotextil, las barreras de grava y antracita, la tubería de recirculación en PVC, la oxigenación de la fase 1 a la 2 , la instalación de los flotadores para el tanque y la fase 1 y el empleo de la planta ornamental Anturio Blanco para analizar la depuración de agua residual del canal de Cundinamarca en el humedal artificial de la Universidad Católica de Colombia.

6.1.2. CONTROL Y MONITOREO DE AGUA RESIDUAL (CANAL DE CUNDINAMARCA)

Se realizó un cronograma de las actividades que se llevaron a cabo durante el monitoreo y control del agua que se muestra a continuación.

Tabla 29. Propuesta Para Realizar Control De Agua En Humedal Artificial

| CONTROL DE AGUA | FECHAS | DETALLE | LABORATORIOS A REALIZAR |
|-----------------|------------|--|--|
| MONTAJE | 13/08/2019 | Se realiza el lavado de los materiales y se empieza a realizar el montaje donde se coloca nueva grava para realizar filtros entre las plantas, se realiza el montaje de la fase I de acuerdo a lo estipulado en el anteproyecto, se realiza la siembra de los juncos que había antes en el humedal anterior y se adiciona la siembra de los Anturios (plantas ornamentales), se coloca geotextil para que los sedimentos no ingresen a la tubería se realizan las conexiones, se llena el humedal con agua lluvia y se deja estancada el agua mientras la otra práctica se puede terminar. | N/A |
| MONTAJE | 15/08/2019 | Se realizan las conexiones que faltaban para que el humedal pueda realizar la recirculación correspondiente al sistema, y se realizan ajustes. | N/A |
| ENTRADA | 17/08/2019 | Se trae muestra de agua problema No. 1 y se le vierte al humedal artificial, a dicha muestra se le realizan los siguientes laboratorios de control de agua. | pH-conectividad-sst-resistividad-temperatura-salinidad-color-turbiedad-alcalinidad-dureza total-dureza magnesio-dureza calcio |
| 5 DIAS | 22/08/2019 | Se realiza control del agua para determinar el proceso que tiene el agua al pasar los días. | pH -conectividad-sst-resistividad-temperatura-salinidad-color-turbiedad-alcalinidad-dureza total-dureza magnesio-dureza calcio |
| TOMA DE DATOS | 24/08/2019 | Se realizar registro fotográfico y toma de datos del estado del humedal, se realizará un esquema para tener los planos definitivos en AutoCAD. | N/A |
| 21 DIAS | 07/09/2018 | Se realiza control del agua para determinar el proceso que tiene el agua al pasar los 21 días. | pH -conectividad-sst-resistividad-temperatura-salinidad-color-turbiedad-alcalinidad-dureza total-dureza magnesio-dureza calcio |

Continúa tabla

| | | | |
|---------------|------------|--|--|
| ENTRADA | 07/09/2019 | Se trae muestra de agua problema N° 2 y se vierte en el humedal artificial, a dicha muestra se le realizan los siguientes laboratorios de control de agua. | pH -conectividad-sst-resistividad-temperatura-salinidad-color-turbiedad-alcalinidad-dureza total-dureza magnesio-dureza calcio |
| 5 DIAS | 12/09/2019 | Se realiza control del agua para determinar el proceso que tiene el agua al pasar los días. | pH -conectividad-sst-resistividad-temperatura-salinidad-color-turbiedad-alcalinidad-dureza total-dureza magnesio-dureza calcio |
| TOMA DE DATOS | 19/09/2018 | Se realiza registro fotográfico y toma de datos del estado del humedal | N/A |
| TOMA DE DATOS | 21/09/2019 | Se realiza registro fotográfico y toma de datos del estado del humedal | N/A |
| 21 DIAS | 28/09/2019 | Se realiza control del agua para determinar el proceso que tiene el agua al pasar los días. | pH-conectividad-sst-resistividad-temperatura-salinidad-color-turbiedad-alcalinidad-dureza total-dureza magnesio-dureza calcio |
| TOMA DE DATOS | 31/08/2019 | Se realiza registro fotográfico y toma de datos del estado del humedal | N/A |

Fuente: Propia

7. RESULTADOS DEL HUMEDAL REDISEÑADO

Para realizar un mejor análisis y comparación de los resultados obtenidos del agua residual del Canal de Cundinamarca tratada en el humedal artificial, se tomaron 2 muestras.

Muestra 1: se recolectó el día viernes 16 de agosto del Canal de Cundinamarca, se añadió en el humedal el día 17 de agosto y estuvo en recirculación durante 21 días, esta agua presentaba las siguientes características:

- Olor pestilente.
- Color negro.
- Sólidos suspendidos.

Muestra 2: se recolectó el día sábado 7 de septiembre del Canal de Cundinamarca, se añadió en el humedal ese mismo día y estuvo en recirculación durante 21 días, esta agua presentaba las siguientes características:

- Olor pestilente.
- Color negro.
- Sólidos suspendidos.

Ilustración 49. Muestra 1 canal de Cundinamarca.



Fuente propia.

Ilustración 50. Muestra 2 canal de Cundinamarca.





Fuente propia.

En las prácticas de laboratorio realizadas en la Universidad Católica se hicieron mediciones a la entrada, a las 2 horas, a los 5 días, y a los 21 días de recirculación, para la Fase 1 y 2 del humedal artificial.

La medición realizada fue de los siguientes parámetros: pH, conductividad, resistividad, salinidad, sólidos suspendidos totales, temperatura, turbiedad, color, dureza total, dureza cálcica, dureza magnésica, hierro y alcalinidad. La medición de los parámetros de DBO₅ y DQO se desarrollaron a la entrada y a los 21 días en el sistema para las 2 muestras, se recurrió a un laboratorio externo llamado ALLCHEM LTDA, debido a que, en el laboratorio de aguas de la universidad, no es posible realizar la medición de estos parámetros.



En la **Tabla 30** se presentan los resultados obtenidos de la muestra 1 analizada y en la TABLA 31 se presentan los resultados obtenidos de la muestra 2 analizada.

Tabla 30. Resultados Muestra No.1

| <div>  <div>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia Vitalicio M. Hernández</div> <div>RESULTADOS DE LABORATORIO</div>  </div> | | | | | | | |
|---|---------------------------|-----------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|
| MUESTRA 1 DE AGUA CANAL DE CUNDINAMARCA | | | | | | | |
| LABORATORIO | UNIDADES | ENTRADA | 2 HORAS | 5 DIAS | | 21 DIAS | |
| | | | | FASE 1 | FASE 2 | FASE 1 | FASE 2 |
| PH | --- | 7,06 | 7,66 | 7,08 | 7,67 | 7,51 | 7,63 |
| CONDUCTIVIDAD | µs/cm | 1387 | 882 | 864 | 820 | 1135 | 1114 |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | 725 | 1132 | 1167 | 1217 | 882 | 897 |
| SALINIDAD | SAL | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 735 | 472 | 461 | 438 | 604 | 594 |
| TEMPERATURA | °C | 15,1 | 14,6 | 18 | 17,9 | 17,3 | 17,6 |
| TURBIEDAD | NTU | 134 | 19,5 | 0,906 | 3,14 | 0,79 | 6,61 |
| COLOR | PtCo | 1952 | 355 | 89 | 88 | 115 | 139 |
| DUREZA TOTAL | mg/L | 170 | 170 | 190 | 180 | 306 | 324 |
| DUREZA Calcio | mg/L | La absorbancia es muy densa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DUREZA Magnesio | mg/L | La absorbancia es muy densa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ALCALINIDAD | mg/L de CaCo ₃ | 375 | 202 | 170 | 156 | 74 | 131 |
| HIERRO | mg/L de Fe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DBO-5 (DEMANADA BIOLÓGICA DE OXÍGENO) | mgO ₂ /L | 141,15 | N/A | N/A | N/A | 83,19 | |
| DQO (DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO) | mgO ₂ /L | 498,82 | N/A | N/A | N/A | 151,47 | |

Fuente propia.

Tabla 31. Resultados Muestra No.2

|  UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia Vigilada Mineducación RESULTADOS DE LABORATORIO  | | | | | | | |
|--|---------------|-----------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|
| MUESTRA 2 DE AGUA CANAL DE CUNDINAMARCA | | | | | | | |
| DETALLE | UNIDADES | ENTRADA | 2 HORAS | 5 DIAS | | 21 DIAS | |
| | | | | FASE 1 | FASE 2 | FASE 1 | FASE 2 |
| PH | --- | 7.27 | 7.58 | 8.15 | 8.13 | 7.98 | 7.57 |
| CONDUCTIVIDAD | µs/cm | 1308 | 1153 | 1284 | 1284 | 1310 | 1260 |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | 764 | 867 | 779 | 779 | 761 | 791 |
| SALINIDAD | SAL | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 700 | 615 | 686 | 686 | 704 | 675 |
| TEMPERATURA | °C | 17.1 | 18.5 | 19.5 | 19.5 | 20.5 | 20.3 |
| TURBIEDAD | NTU | 136 | 9.69 | 1.1 | 1 | 45.3 | 7.72 |
| COLOR | PtCo | 2385 | 272 | 122 | 128 | 417 | 166 |
| DUREZA TOTAL | mg/L | 306 | 324 | 332 | 328 | 400 | 360 |
| DUREZA Calcio | mg/L | La absorbancia es muy densa | 0 | -0.07 | 0.12 | 0 | 0 |
| DUREZA Magnesio | mg/L | La absorbancia es muy densa | 0 | 0.02 | 1.4 | 0 | 0 |
| ALCALINIDAD | mg/L de CaCo3 | 287 | 318 | 350 | 315 | 310 | 300 |
| HIERRO | mg/L de Fe | 0.37 | 0.35 | 0.25 | 0.22 | 0.11 | 0.2 |
| DBO-5 (DEMANADA BIOLOGICA DE OXIGENO) | mgO2/L | 282.13 | N/A | N/A | N/A | 90.21 | |
| DQO (DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO) | mgO2/L | 529.99 | N/A | N/A | N/A | 120.29 | |

Fuente propia.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

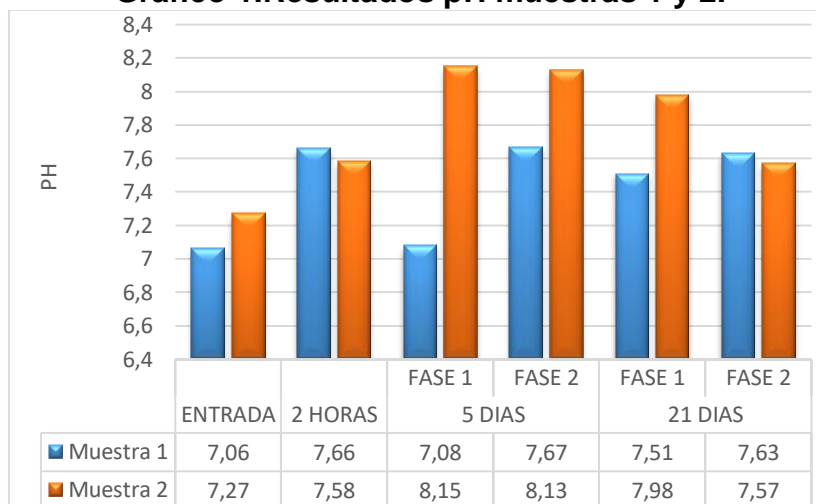
8.1. COMPARACIÓN MUESTRA 1 Y 2

En este capítulo se realiza la comparación de las muestras No.1 y No.2 para definir la diferencia de los parámetros medidos a las 2 horas y 21 días de recirculación.

8.1.1. pH

“Las mediciones de pH se presentan en una escala de 0 a 14, con 7 considerado como neutro, cuando el agua es inferior a 7 se considera ácida y cuando esta entre 7 y 14 se considera base o alcalina” (Carbotecnia, 2014).

Gráfico 1. Resultados pH muestras 1 y 2.



Fuente propia.

De acuerdo con el **Gráfico 1** se evidencia que la muestra No.2 presentó valores de pH más elevados en comparación con la muestra No.1, a los 5 días de recirculación la muestra No. 2 presentó un aumento de pH del 13% con respecto a la muestra No.1. Sin embargo, a los 21 días de recirculación el pH de la muestra 2 bajó 7.11% con respecto a su pH más alto en los 5 días de recirculación de la fase 1.

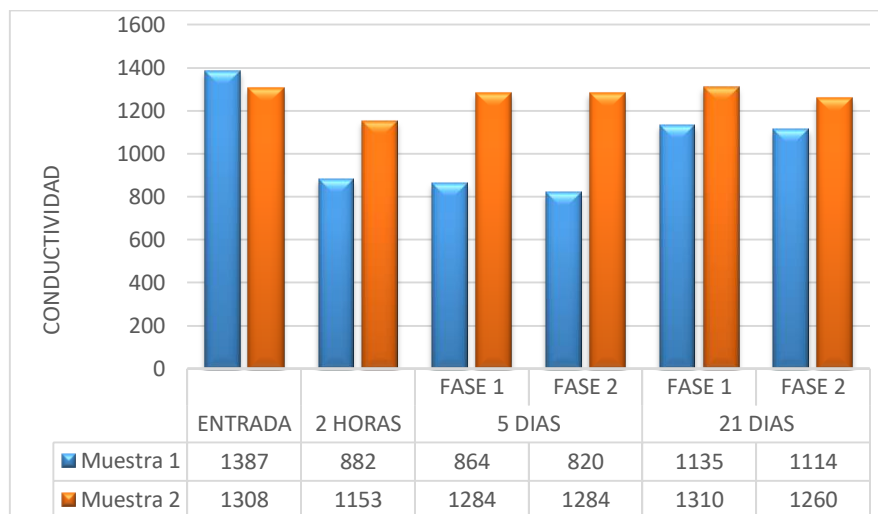
En general se evidencia que el agua para las 2 muestras se comporta como una base durante los 21 días de recirculación.

8.1.2. CONDUCTIVIDAD

“Es un indicador de la presencia de sales disueltas en el agua y como tal se introducen como un objetivo de calidad con el propósito de controlar la presencia fundamental de cloruros, fluoruros, sulfatos y sulfuros. Adicionalmente, el control de la conductividad es

necesaria cuando se desea destinar el agua para uso agrícola por su relación con la alteración que puede ocasionar en la salinidad de los suelos” (CORMACARENA, 2010).

Gráfico 2. Resultados conductividad muestras 1 y 2.



Fuente propia.

En el **Gráfico 2** se muestran los valores de conductividad de las dos muestras realizadas.

A la entrada ambas muestras presentan valores de conductividad similares, transcurridas 2 horas el agua de la muestra No.1 presenta una reducción de 36% y sigue disminuyendo hasta los 5 días de recirculación, a los 21 días aumenta 27%. Quiere decir que la reducción más eficiente se produjo a los 5 días para la muestra No.1

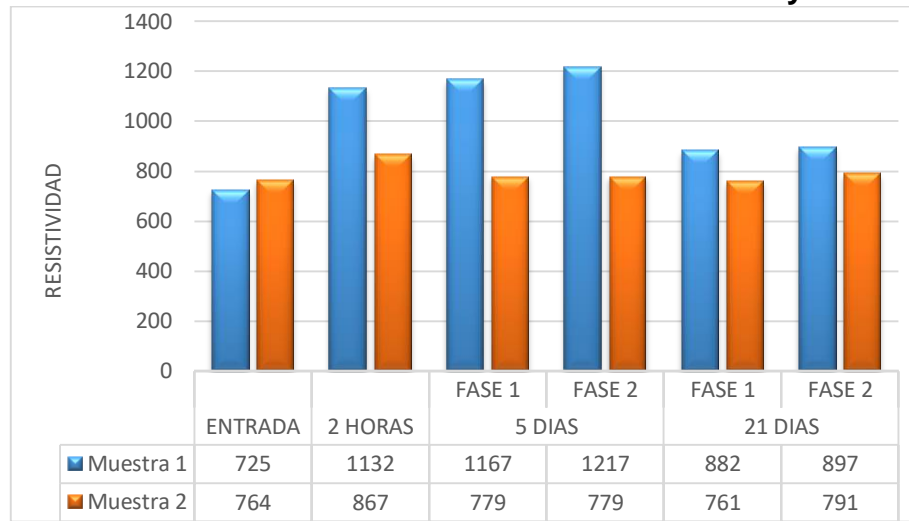
La conductividad en la muestra No.2 disminuyó 12% a las 2 horas, sin embargo, a los 5 días aumenta 10% y sigue aumentando 2% a los 21 días de recirculación.

Quiere decir que la muestra No.1 tuvo resultados más favorables en la remoción de la conductividad eléctrica, pero esto sucede solo a las 2 horas y 5 días de recirculación.

8.1.3. RESISTIVIDAD

“La resistividad es inversa a la conductividad, se define como la medida de la capacidad de una solución para resistir el flujo de una corriente eléctrica. La conductividad y la resistividad dependen del contenido de sales presentes en el agua” (HACH COMPANY, 2017).

Gráfico 3. Resultados resistividad muestras 1 y 2.



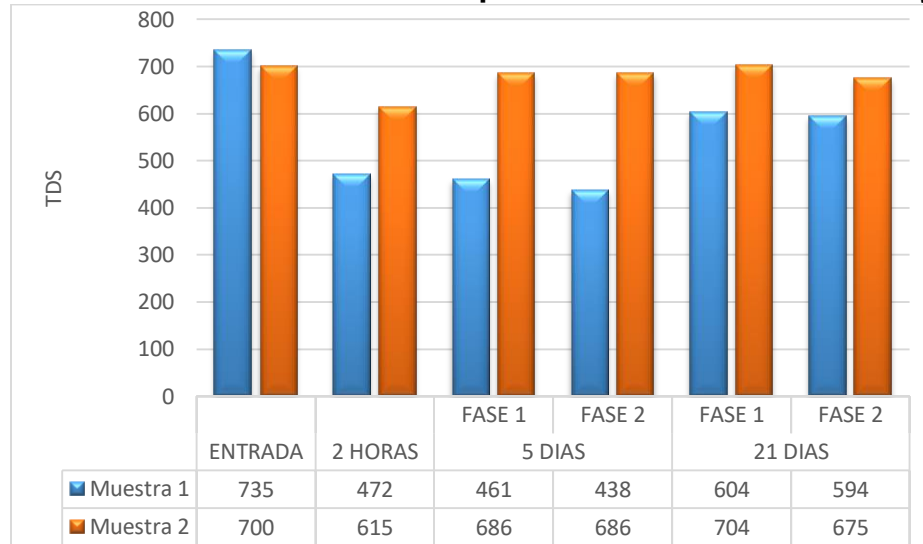
Fuente propia.

De acuerdo con el **Gráfico 3**, se observa un aumento de 36% de resistividad a las 2 horas en la muestra No.1 y luego aumenta aproximadamente 3% a los 5 días, para luego volver a descender un 26% a los 21 días de recirculación, realizando la comparación con los resultados obtenidos de conductividad para la muestra No.1 y No.2 se confirma lo consultado, la resistividad es inversa a la conductividad.

8.1.4. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TDS)

“Es una medida de la cantidad de material disuelto en el agua. Este material puede incluir lo siguiente: carbonato, bicarbonato, cloruro, sulfato, fosfato, nitrato, calcio, magnesio, sodio, iones orgánicos y otros iones. Ciertos niveles de estos iones en el agua son necesarios para la vida acuática. Los cambios en concentraciones del TDS pueden ser dañinos debido a que la densidad del agua determina el flujo del agua hacia y desde las células de un organismo. Sin embargo, si las concentraciones del TDS son demasiado altas o demasiado bajas, el crecimiento de gran parte de la vida acuática puede ser limitado y se puede producir la muerte” (Fluence, 2017).

Gráfico 4. Resultados sólidos suspendidos totales muestras 1 y 2.



Fuente propia.

Según el **Gráfico 4**, se evidencia que la mayor reducción de sólidos suspendidos para la muestra No.1 ocurrió a 5 días en la fase 2 esta reducción fue de aproximadamente 40%, sin embargo, a los 21 días los sólidos suspendidos para la muestra No.1 aumentaron un 26%.

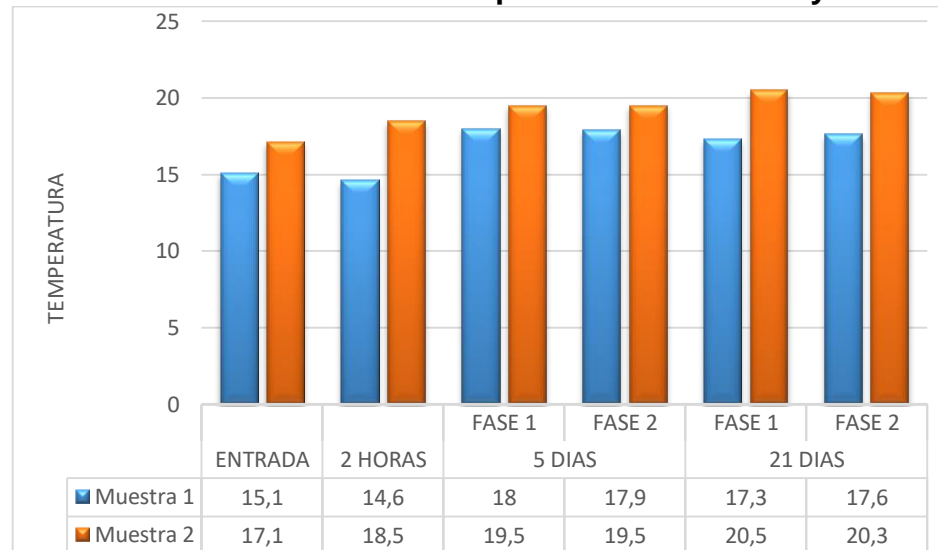
Para la muestra No.2 ocurrió una reducción de 12% a las 2 horas, a los 5 días de recirculación se removió el 2% con respecto a la cantidad de sólidos suspendidos totales que tenía el agua a la entrada.

De acuerdo con este análisis se evidencia que el tiempo óptimo de remoción de este parámetro ocurre a las 2 horas y 5 días de recirculación.

8.1.5. TEMPERATURA

“Este parámetro es una variable que tiene relación con todas las reacciones bioquímicas que ocurren en el agua. Se introduce como un objetivo de calidad con el propósito fundamental de conservar la biota existente en los cuerpos de agua” (CORMACARENA, 2010).

Gráfico 5. Resultados temperatura muestras 1 y 2.



Fuente propia.

La temperatura máxima que alcanzó la muestra No.1 fue de 18°C a los 5 días un 16% de incremento con respecto al agua residual de entrada, no obstante, la temperatura se disminuye un 2% a los 21 días de recirculación.

La temperatura máxima alcanzada por la muestra 2 fue de 20,5°C a los 21 días de recirculación, tuvo un incremento de 16% con respecto al agua de entrada.

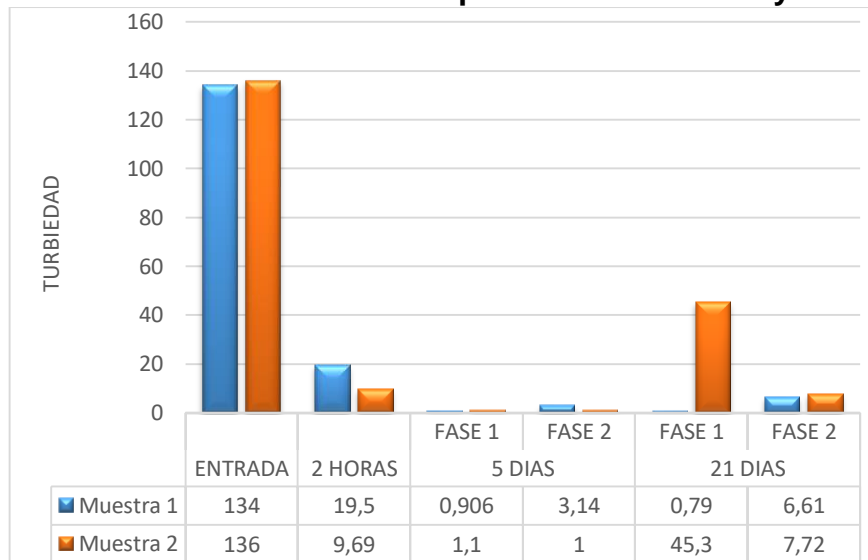
Para ambos casos se determina que existe aumento de temperatura ya sea a las 2 horas, 5 o 21 días de recirculación, porque el humedal se encuentra en un medio cerrado y con una ventana cerca, esto causa que la temperatura del agua aumente, lo cual es bueno porque las plantas pueden realizar mejor sus procesos.

“Una investigación de la Universidad de Córdoba (UCO) y del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS) ha permitido observar que la temperatura del suelo influye en la forma en la que la planta adquiere este recurso. En los meses más fríos, la capacidad de absorción de agua por las raíces se reduce produciendo síntomas de marchitez en la planta aun cuando existe en el suelo suficiente agua para satisfacer las demandas de la planta”(García-Tejera et al. 2016).

8.1.6. TURBIEDAD

“La turbiedad en el agua es causada por materia suspendida y coloidal tal como arcilla, sedimento, materia orgánica e inorgánica dividida finamente, plancton y otros microorganismos microscópicos. Es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión. A mayor intensidad de dispersión de la luz, la turbiedad será mayor” (IDEAM, 2007).

Gráfico 6. Resultados temperatura muestras 1 y 2.



Fuente propia.

De acuerdo con el **Gráfico 6**, se evidencia una gran remoción de 99% en turbiedad para la muestra No.1 a los 5 y 21 días de recirculación, esta remoción se presenta en la fase 1 del humedal. Para la muestra No.2 la mayor remoción ocurrió a los a los 5 días de recirculación con un 99% de remoción.

Se analiza que esta gran remoción ocurre gracias al empleo de antracita y carbón activado, en las fases 1 y 2, además, la adición de geotextil al sistema ayuda a retener las partículas sólidas y la oxigenación del agua que se presenta en la fase 1 y 2 permite que las plantas remuevan mayor cantidad de materia orgánica.

También se verifica que los tiempos más óptimos de remoción de turbiedad para ambas fases y para ambas muestras, se presenta a los 5 días de recirculación.

8.1.7. COLOR

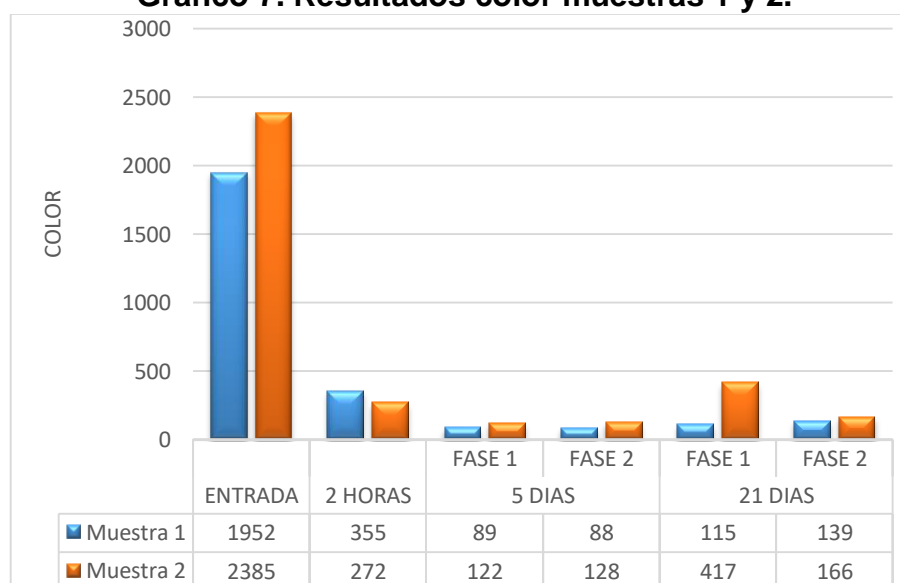
“Las causas más comunes del color del agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución, el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas madera, raíces, en diferentes estados de descomposición, y la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales.

Se reconocen dos tipos de color en el agua:

- Color verdadero: el color de la muestra una vez que se ha removido su turbidez.
- Color aparente: incluye el color de las sustancias en solución, coloidales y el color debido al material suspendido.

“Normalmente el color aumenta con el incremento de pH” (Rojas, 2002).

Gráfico 7. Resultados color muestras 1 y 2.



Fuente propia.

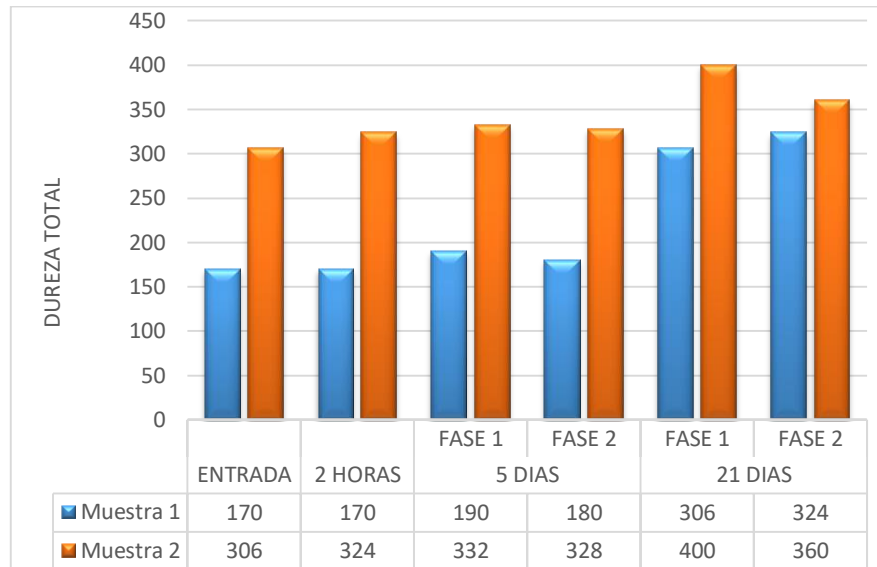
8.1.8. DUREZA TOTAL

“Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. El agua denominada comúnmente como “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en muy poca cantidad” (Facsa, 2017).

“Como aguas duras se consideran aquellas que requieren grandes cantidades de jabón para generar espuma y producen incrustaciones en las tuberías de agua caliente,

calentadores, calderas y otras unidades en las cuales se incrementa la temperatura del agua” (Rojas, 2002).

Gráfico 8. Resultados dureza total muestras 1 y 2.



Fuente propia.

Se observa en el **Gráfico 8**, que el agua residual se vuelve más dura al colocarla en el humedal, en el muestra No.1 aumenta 47% a los 21 días de recirculación y en la muestra No.2 aumenta 24%, este parámetro en sí indica que en el humedal el agua adquiere mayor concentración de minerales disueltos que son sales de calcio y de magnesio, estos causan que el agua aumente su dureza, esto solo afecta que al entrar en contacto con jabones, no se genere espuma, pero para la salud, “la OMS considera que los datos actuales no son suficientes para emitir una recomendación general sobre el nivel de dureza adecuado para el agua de consumo humano” (iAgua, 2019).

8.1.9. ALCALINIDAD

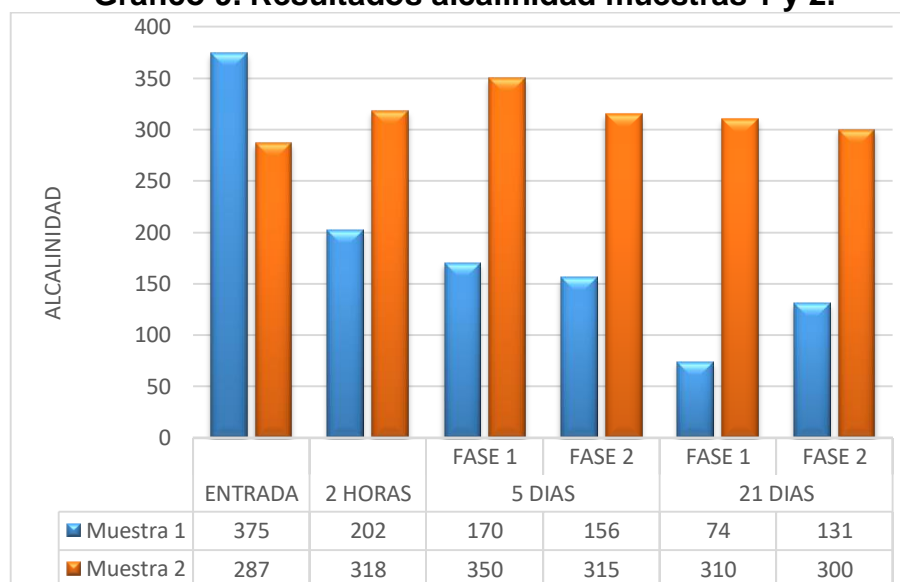
“La alcalinidad de un agua puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos, como su capacidad para reaccionar con iones de hidrógeno, como su capacidad protones o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH)” (Rojas, 2002).

“Definimos la alcalinidad total como la capacidad del agua para neutralizar ácidos y representa la suma de las bases que pueden ser tituladas. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas.

No sólo representa el principal sistema amortiguador (tampón, buffer) del agua dulce, sino que también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva de CO₂ para la fotosíntesis”

“Internacionalmente es aceptada una alcalinidad mínima de 20 mg de CaCO₃/L para mantener la vida acuática. Cuando las aguas tienen alcalinidades inferiores se vuelven muy sensibles a la contaminación, ya que no tienen capacidad para oponerse a las modificaciones que generen disminuciones del pH (acidificación)” (Goyenola, 2007).

Gráfico 9. Resultados alcalinidad muestras 1 y 2.



Fuente propia.

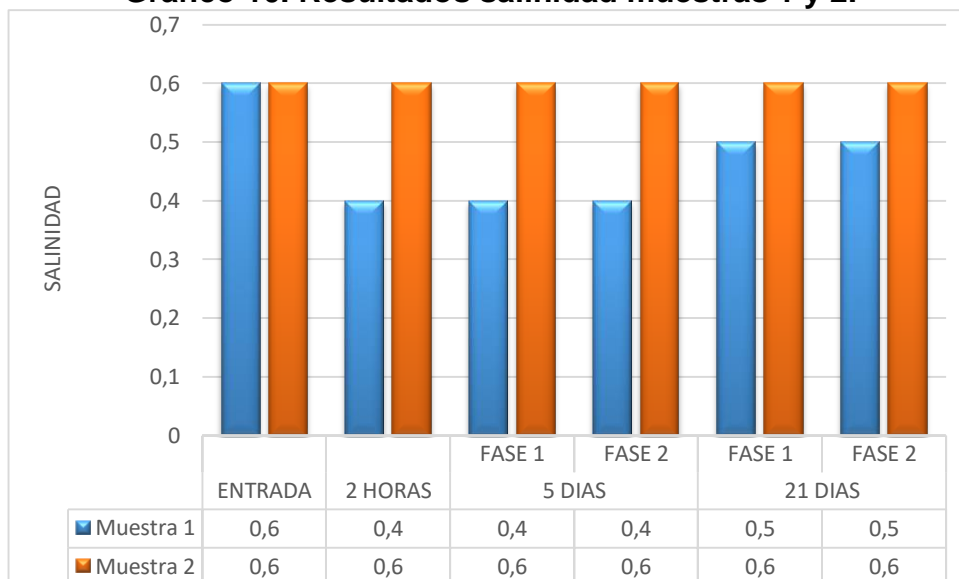
Según el **Gráfico 9**, en la muestra No.1 se presenta mayor remoción de alcalinidad durante los 21 días de recirculación, la remoción en la fase 1 fue de 80% y para la fase 2 fue de 65%. De acuerdo con el gráfico se evidencia que para la muestra No. 1 se produjo remoción en orden descendente, por el contrario la muestra No.2 aumentó la alcalinidad durante las 2 horas y 21 días de recirculación. Esto significa que la muestra No.2 tuvo mayor presencia de hidrógeno que la muestra No.1.

8.1.10. SALINIDAD

“La salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en agua. La salinidad y la conductividad están relacionadas porque la cantidad de iones disueltos aumentan los valores de ambas. Las sales en el mar son principalmente de cloruro de sodio (NaCl).

El exceso de sales es una de las mayores preocupaciones en la reutilización del agua para fines agrícolas. Un alto contenido en sales presentes en el agua supone un aporte de sales en el suelo que sustenta la planta afectando la productividad del cultivo, degradando la estructura de la tierra y generando problemas de contaminación en las aguas subterráneas” (LENNTECH, 2019).

Gráfico 10. Resultados salinidad muestras 1 y 2.



Fuente propia.

Según los resultados del **Gráfico 10**, se evidencia mayor remoción de las sales que contiene el agua residual en la muestra No.1, a las 2 horas y 5 días de recirculación se disminuye el contenido de sal en un 33%, sin embargo a los 21 días de recirculación aumenta un 20% con respecto a los 5 días, esto significa que los resultados de la muestra No.1 fueron más óptimos a las 2 horas y 5 días de recirculación.

Sin embargo, la muestra No.2 mantuvo un contenido constante de salinidad durante todo el proceso de recirculación (a las 2 horas, 5 y 21 días).

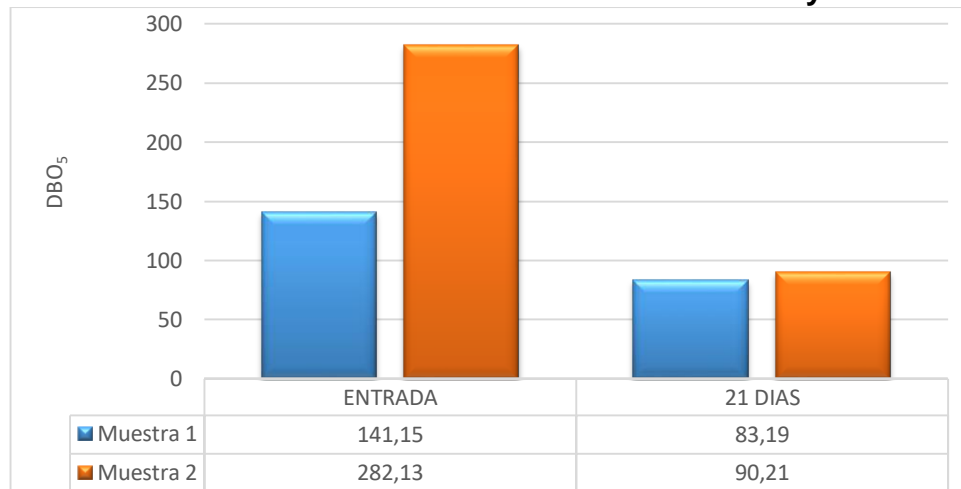
8.1.11. DBO₅

“Variable objeto de medición por ser un indicador de vertimientos de origen doméstico e industrial, por estar dentro de los parámetros objeto de cobro en la tasa retributiva y de los parámetros sugeridos en el decreto 3930 de 2010 (art. 7 Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico). Adicionalmente, su medición es importante por la recurrente descarga de aguas residuales sobre las fuentes hídricas” (CORMACARENA, 2010).

“Con carácter general, cuanta más contaminación, más DBO. Proporciona una medida aproximada y algunos valores de referencia en función del tipo del agua pueden ser”: (Nihon Kasetsu Europe, 2017).

- Pura: entre 2 y 20 mg/l
- Poco contaminada entre 20 y 100 mg/l
- Medianamente contaminada entre 100 y 500 mg/l
- Muy contaminada entre 500 y 3.000 mg/l
- Extremadamente contaminada entre 3.000 y 15.000 mg/l

Gráfico 11. Resultados DBO₅ muestras 1 y 2.



Fuente propia.

De acuerdo con la información anterior se reconoce que el agua empleada para el ensayo se encuentra entre 100 mg/L y 500mg/L de DBO, quiere decir que es un agua medianamente contaminada.

Se evidencia en el **Gráfico 11**, una remoción del 41% de DBO₅ para la muestra No.1 a los 21 días de recirculación y una remoción del 68% para la muestra No.2. Esto quiere decir que las plantas ornamentales son eficientes en la remoción de materia orgánica y el resultado es más óptimo cuando el agua tiene mayor contenido de DBO₅, debido a que la muestra No.2 presentó mayores valores en remoción de material orgánico.

8.1.12. DQO

“Es la demanda química de oxígeno del agua. Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO_2 y H_2O . Se expresa también en mgO_2/l . Cuanto mayor es la DQO, más contaminada está el agua. La DQO es una prueba que solo toma alrededor de tres horas, por lo que los resultados se pueden tener en mucho menor tiempo que lo que requiere una prueba de DBO. La DQO en aguas industriales puede situarse entre 50 y 2.000 mgO_2/l , aunque puede llegar a 5.000 según el tipo de industria.

La diferencia principal entre la DBO y la DQO es que la segunda engloba la primera, e incluye más cosas. En la DBO sólo se detecta el material orgánico degradado biológicamente o que es biodegradable, mientras que en la DQO se busca la oxidación completa de la muestra, de manera que todo el material orgánico, biodegradable y no biodegradable, es químicamente oxidado. Para una muestra dada de agua, el valor de DQO siempre ha de ser mayor que el de DBO” (Nihon Kasetsu Europe, 2017).

Gráfico 12. Resultados DQO muestras 1 y 2.



Fuente propia.

El agua residual empleada entra con una gran carga de DQO al humedal artificial. De acuerdo con el **Gráfico 12**, a los 21 días de recirculación se presenta una remoción del 79% de DQO en la muestra No.1 y en la muestra No.2 una remoción del 77% de DQO. Esto quiere decir que las plantas ornamentales degradan la materia orgánica presente en el agua residual empleada.

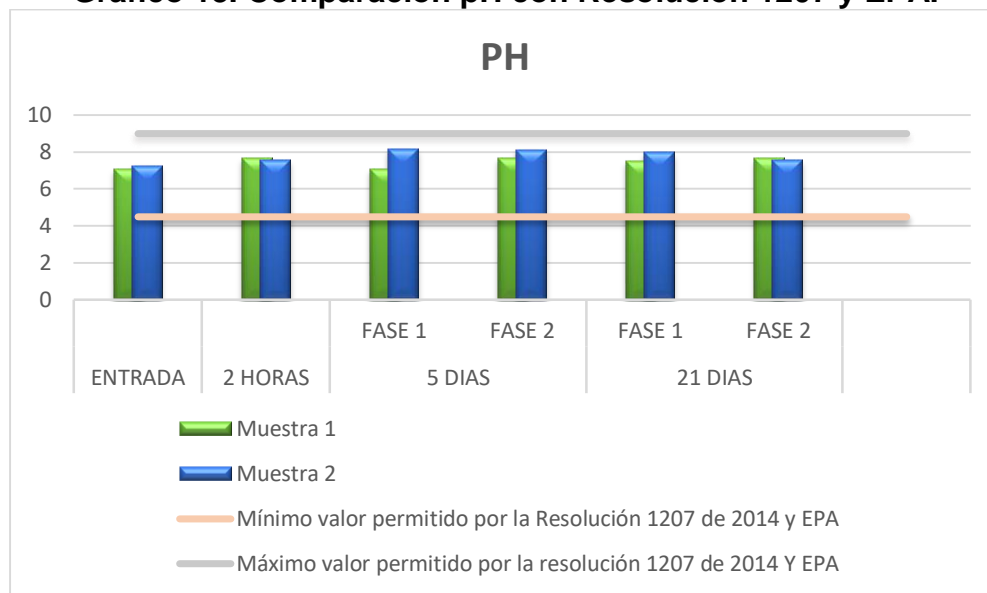
8.2. COMPARACIÓN MUESTRA 1 Y 2 CON NORMATIVA VIGENTE

En este capítulo se analiza la comparación de los parámetros obtenidos del agua tratada con la normatividad, para definir si cumple con los usos que establece cada norma.

8.2.1. pH

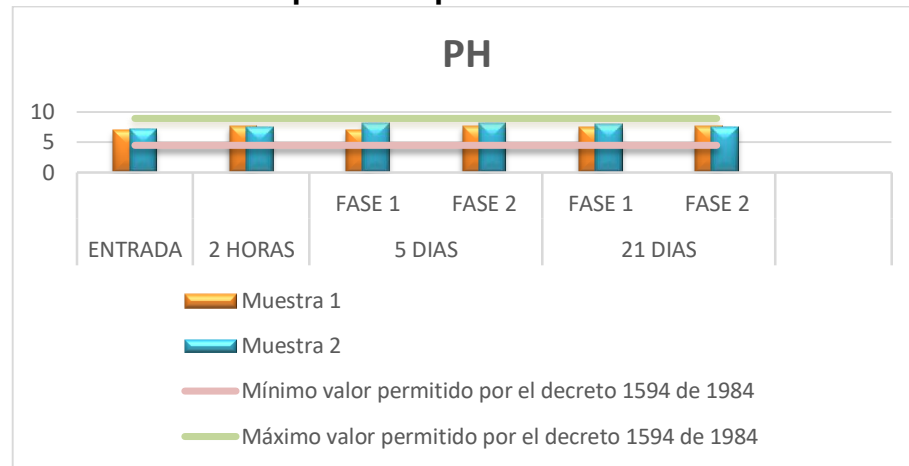
De acuerdo a los resultados presentados en el **Gráfico 13** y según el pH para riego permitidos por la resolución 1207 de 2014 se afirma que, a los 5 y 21 días de recirculación, el agua cumple con los estándares para ser empleada en riego de jardines y cultivos. Según la **Tabla 17. Criterio de calidad de agua para riego en uso agrícola según la agencia de protección ambiental de estados unidos EPA**, el valor de pH cumple para reúso agrícola.

Gráfico 13. Comparación pH con Resolución 1207 y EPA.



Fuente propia.

Gráfico 14. Comparación pH con Decreto 1594 de 1984.



Fuente propia.

De acuerdo con el **Gráfico 14** los valores de pH para riego permitidos el decreto 1594 de 1984 se afirma que a los 5 y 21 días de recirculación, el agua cumple con los estándares para la destinación del recurso para uso agrícola.

8.2.2. CONDUCTIVIDAD

Gráfico 15. Comparación Conductividad con Resolución 1207.



Fuente propia.

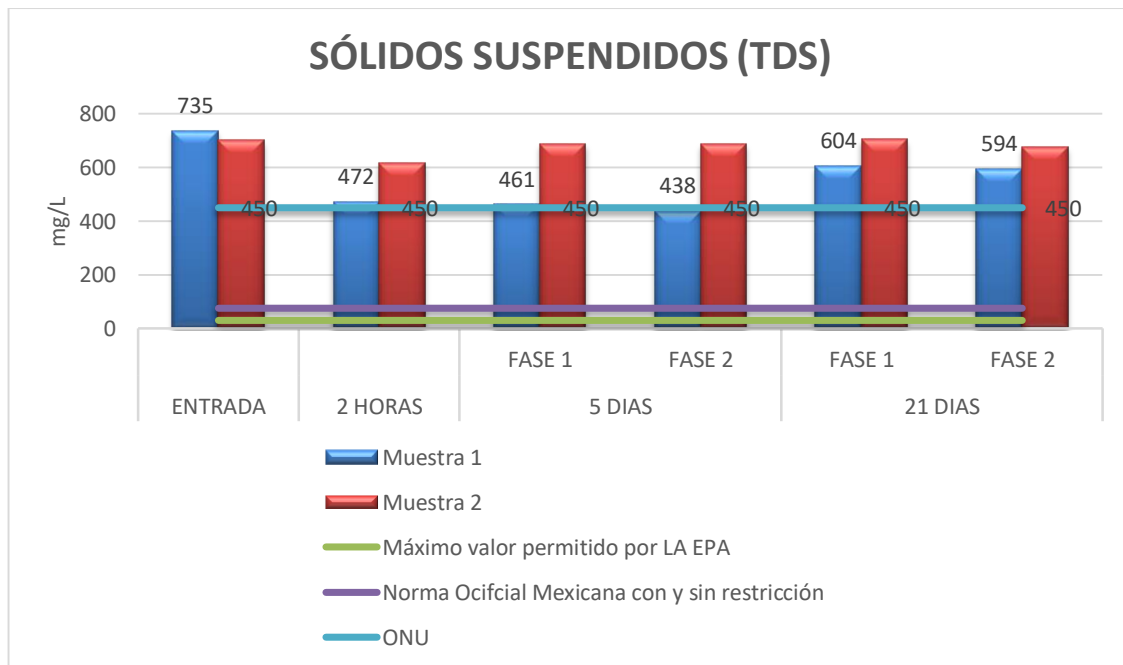
La resolución 1207 de 2014, establece que la conductividad del agua para riego agrícola, de jardines y áreas verdes debe ser menor o igual a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de acuerdo con los resultados obtenidos en el **Gráfico 15**, el agua que se obtiene del humedal cumple con lo estipulado a las 2 horas, 5 y 21 días de recirculación.

8.2.3. RESISTIVIDAD

De acuerdo con la normativa consultada, no hay referencia de cuál es el valor óptimo para este parámetro.

8.2.4. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TDS)

Gráfico 16. Comparación TDS con normativa EPA 2004.



Fuente propia.

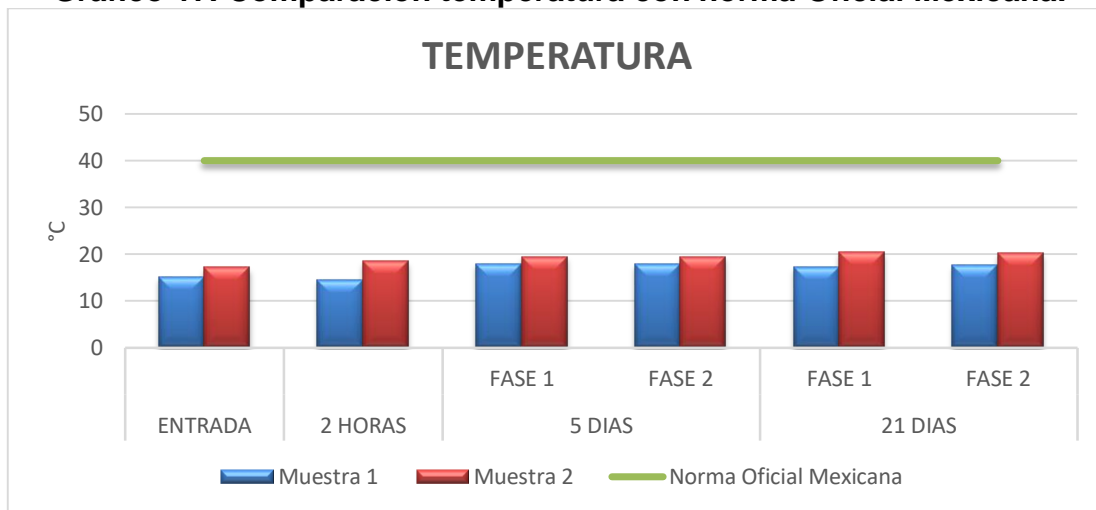
Según el **Gráfico 16**, los resultados para sólidos suspendidos totales no cumplen con el mínimo que establece LA EPA y la norma oficial mexicana para reúso urbano.

La organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) en el año 2000 establece una concentración de <450 mg/l de sólidos disueltos totales destinadas a riego.

Según los parámetros obtenidos en el **Gráfico 16**, solo a los 5 días de recirculación en la fase 2 cumple con lo que establece la ONU para reúso agrícola.

8.2.5. TEMPERATURA

Gráfico 17. Comparación temperatura con norma Oficial Mexicana.

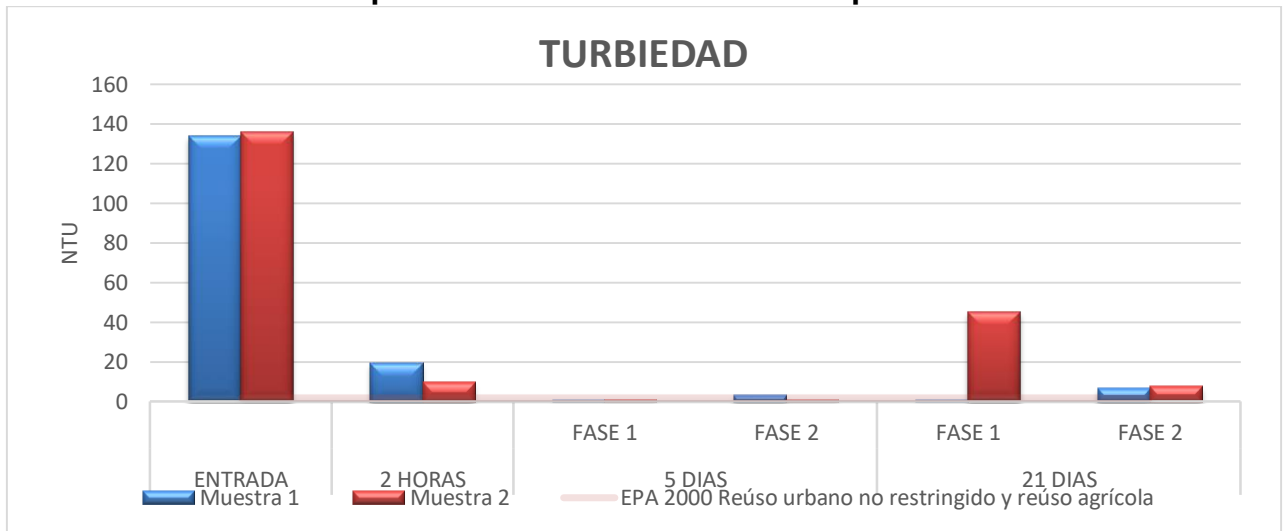


Fuente propia.

Acorde con el **Gráfico 17**, la temperatura medida de las dos muestras cumple con el parámetro que establece la Norma Oficial Mexicana para reúso urbano a los 5 y 21 días de recirculación.

8.2.6. TURBIEDAD

Gráfico 18. Comparación Turbiedad con la EPA para reúso urbano.



Fuente propia.

Según la EPA 2000 el parámetro de turbiedad para reúso urbano tiene que ser <2 NTU, de acuerdo con el **Gráfico 18**, lo establecido por esta norma se cumple para ambas muestras en las fases 1 y 2 a los 5 días de recirculación.

8.2.7. COLOR

No se encontró en la normativa este parámetro de calidad de agua para reúso.

8.2.8. DUREZA TOTAL

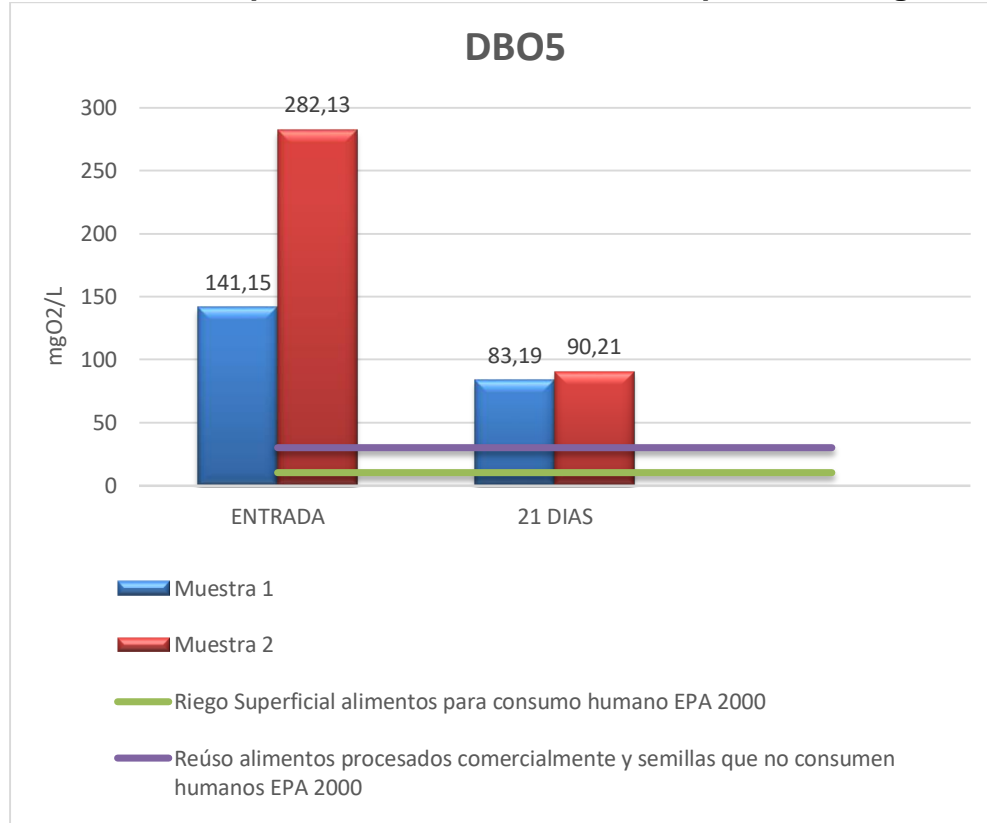
No se encontró en la normativa este parámetro de calidad de agua para reúso.

8.2.9. ALCALINIDAD

No se encontró en la normativa este parámetro de calidad de agua para reúso.

8.2.1. DBO₅

Gráfico 19. Comparación DBO₅ con EPA 2000 para reúso agrícola.

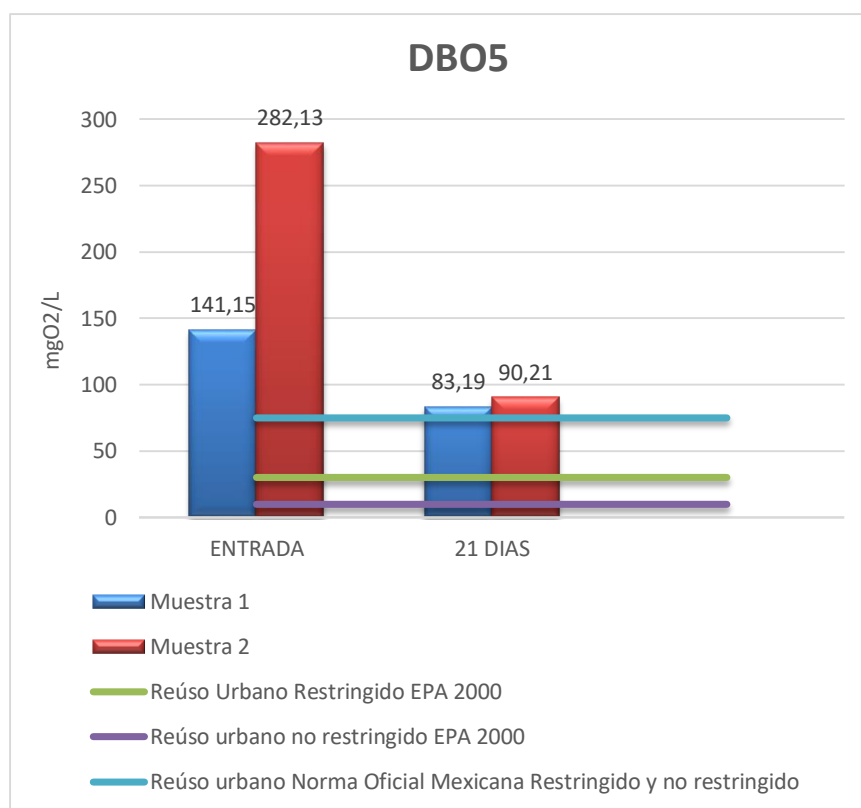


Fuente propia.

Según la EPA 2000, para riego superficial de alimentos que se consumen crudos la cantidad de DBO₅ debe ser menor o igual que 10 mg/L, para riego superficial de cultivos que se procesan comercialmente y para riego de cosechas que no consume el ser humano, el DBO₅ debe ser menor o igual que 30 mg/L.

De acuerdo con esta información y con los resultados del **Gráfico 19**, se puede afirmar que las dos muestras no cumplen para reúso agrícola a los 21 días de recirculación.

Gráfico 20. Comparación DBO5 para reúso urbano Norma oficial mexicana y EPA.

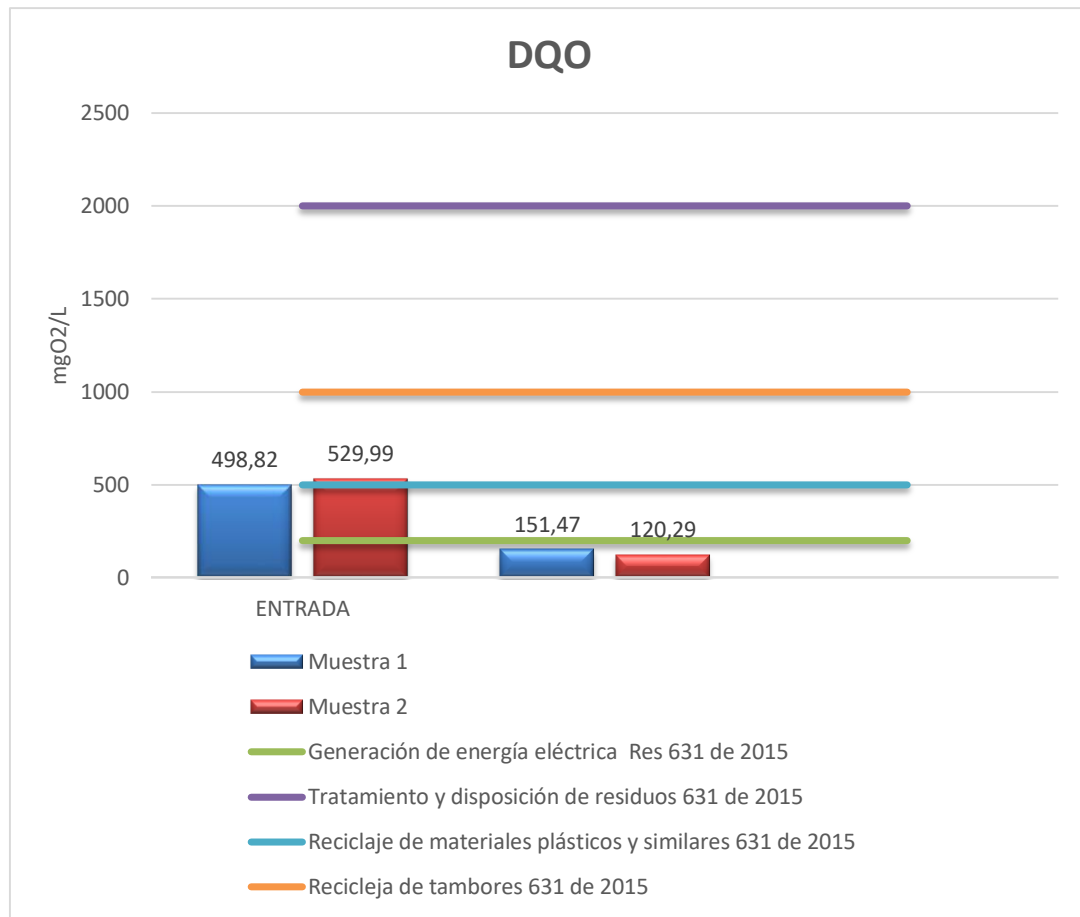


Fuente propia

Para reúso urbano la EPA establece 30 mg/L de DBO₅ en reúso restringido y 10mg/L para reúso no restringido, según el **Gráfico 20**, el agua que se obtiene a los 21 días de recirculación no cumple para este uso y de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana tampoco cumple, debido a que el valor máximo permitido por esta norma es de 75 mg/L.

8.2.2. DQO

Gráfico 21.Comparación DQO con parámetro exigido por la resolución 631 de 2015 para servicios y otras actividades



Fuente propia.

Los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) de las actividades de servicios y otras actividades a cumplir son 200 mg/L O₂ para generación de energía eléctrica, 2000 mg/L O₂ para tratamiento y disposición de residuos, 500 mg/L O₂ para reciclaje de materiales plásticos y similares y 1000 mg/L O₂ para reciclaje de tambores.

De acuerdo con el **Gráfico 21.Comparación DQO con parámetro exigido por la resolución 631 de 2015 para servicios y otras actividades** se establece que las

muestras 1 y 2 cumplen con el parámetro que exige esta resolución para implementarse en las actividades de generación de energía eléctrica, tratamiento y disposición de residuos, reciclaje de materiales plásticos y similares y reciclaje de tambores.

8.3. EFICIENCIA EN REMOCIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL EMPLEANDO PLANTAS ORNAMENTALES

8.3.1. Porcentaje de Remoción en el rediseño del humedal año 2019

Para determinar la eficiencia del humedal se realiza el cálculo con la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Porcentaje de remoción en el rediseño del humedal año 2019.

$$\% \text{ Remoción} = \left(\frac{\text{Datos de entrada} - \text{Datos de salida}}{\text{Datos de entrada}} \right) * 100$$

Fuente propia

Remplazando en la entrada el valor inicial y en la salida el valor de salida a las 2 horas, 5 días fase 1 y 21 días fase 1 y fase 2, para cada muestra tomada del canal de cundinamarca.

Tabla 32. Análisis de Resultados Muestra No.1

| % REMOCIÓN MUESTRA 1 DE AGUA CANAL DE CUNDINAMARCA | | | | | | |
|--|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| LABORATORIO | UNIDADES | 2 HORAS | 5 DIAS | | 21 DIAS | |
| | | | FASE 1 | FASE 2 | FASE 1 | FASE 2 |
| PH | --- | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta |
| CONDUCTIVIDAD | µs/cm | 36,4% | 37,7% | 40,9% | 18,2% | 19,7% |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta |
| SALINIDAD | SAL | 33,3% | 33,3% | 33,3% | 16,7% | 16,7% |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 35,8% | 37,3% | 40,4% | 17,8% | 19,2% |
| TEMPERATURA | °C | 3,3% | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta |
| TURBIEDAD | NTU | 85,4% | 99,3% | 97,7% | 99,4% | 95,1% |
| COLOR | PtCo | 81,8% | 95,4% | 95,5% | 94,1% | 92,9% |
| DUREZA TOTAL | mg/L | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta |
| ALCALINIDAD | mg/L de CaCo3 | 46,13% | 54,67% | 58,40% | 80,27% | 65,07% |
| DBO-5 (DEMANADA BIOLOGICA DE OXIGENO) | mgO2/L | - | - | - | 41% | |
| DQO (DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO) | mgO2/L | - | - | - | 70% | |

Fuente propia

De acuerdo con la **Tabla 32**, se observa que los parámetros de conductividad , salinidad y color tienen mayores porcentajes de remoción durante los 5 días de recirculación, la remoción de turbiedad fué mayor a los 5 y 21 días y la alcalinidad disminuyó a los 21 días de recirculación. A si mismo, se identifica que el parámetro de pH, resistividad, temperatura y dureza total, aumentan desde el momento en que el agua se incorpora en el humedal.

Se observa que la planta ornamental Anturio blanco y Junco común fueron eficientes degradando la materia orgánica presente (DQO y DBO₅).

Tabla 33. Análisis de Resultados Muestra No.2

| % REMOCIÓN MUESTRA 2 DE AGUA CANAL DE CUNDINAMARCA | | | | | | |
|--|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| LABORATORIO | UNIDADES | 2 HORAS | 5 DIAS | | 21 DIAS | |
| | | | FASE 1 | FASE 2 | FASE 1 | FASE 2 |
| PH | --- | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro |
| CONDUCTIVIDAD | µs/cm | 11,9% | 1,8% | 1,8% | Aumenta parámetro | 3,7% |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | 0,4% | Aumenta parámetro |
| SALINIDAD | SAL | Permanece constante | Permanece constante | Permanece constante | Permanece constante | Permanece constante |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 12,1% | 2,0% | 2,0% | Aumenta parámetro | 3,6% |
| TEMPERATURA | °C | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro |
| TURBIEDAD | NTU | 92,9% | 99,2% | 99,3% | 66,7% | 94,3% |
| COLOR | PtCo | 88,6% | 94,9% | 94,6% | 82,5% | 93,0% |
| DUREZA TOTAL | mg/L | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro |
| ALCALINIDAD | mg/L de CaCo ₃ | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro | Aumenta parámetro |
| DBO-5 (DEMANADA BIOLOGICA DE OXIGENO) | mgO ₂ /L | - | - | - | 68% | |
| DQO (DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO) | mgO ₂ /L | - | - | - | 77% | |

Fuente propia.

Según los resultados de la **Tabla 33**, se observa que la conductividad y los sólidos suspendidos presentaron mayor remoción a las 2 horas de recirculación en el humedal artificial y la turbiedad y color presentaron una gran remoción a los 5 días de recirculación.

A si mismo, se identifica que el parámetro de pH, resistividad, temperatura y dureza total y alcalinidad aumentan desde el momento en que el agua se incorpora en el humedal. El parámetro de salinidad no presenta disminución ni aumento, permanece constante.

Al igual que la muestra No.1 se obtuvo que las plantas generaron una gran remoción de materia orgánica.

8.3.1. Cuadro comparativo resultados año 2018 y año 2019

Tabla 34. Cuadro Comparativo Datos de entrada

| CUADRO COMPRATIVO DATOS DE ENTRADA | | | | |
|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| LABORATORIO | UNIDADES | ENTRADA MUESTRA NO.1 | ENTRADA PROTOTIPO 1 | ENTRADA PROTOTIPO 2 |
| PH | --- | 7,1 | 7,55 | 7,06 |
| CONDUCTIVIDAD | μs/cm | 1387,0 | 285,0 | 127,7 |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | 725,0 | 3,5 | 7,8 |
| SALINIDAD | SAL | 0,6 | 0,1 | 0,1 |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 735,0 | 152,0 | 67,9 |
| TEMPERATURA | °C | 15,1 | 17,0 | 15,3 |
| TURBIEDAD | NTU | 134,0 | 26,0 | 10,0 |
| COLOR | PtCo | 1952,0 | 273,0 | 133,0 |
| DUREZA TOTAL | mg/L | 170,0 | - | - |
| DUREZA Calcio | mg/L | La absorbancia es muy densa | - | - |
| DUREZA Magnesio | mg/L | La absorbancia es muy densa | - | - |
| ALCALINIDAD | mg/L de CaCo3 | 375,0 | 75,0 | 33,0 |
| HIERRO | mg/L de Fe | 0,0 | - | - |
| DBO-5 (DEMANADA BIOLOGICA DE OXIGENO) | mgO2/L | 141,2 | - | - |
| DQO (DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO) | mgO2/L | 498,8 | - | - |

RIO ARZOBISPO

CANAL DE CUND

Fuente propia.

En la **Tabla 34** se evidencia una gran diferencia entre los datos de entrada de la muestra No.1 vs la muestra del prototipo 1 y 2 , todos los parámetros medidos para el agua del Canal de Cundinamarca son superiores a los medidos para el agua del rio Arzobispo, exceptuando el pH, que es más alto en el agua del rio Arzobispo, por ende esta agua tenía un pH más alcalino y menor contaminación en comparación.

Tabla 35. Cuadro Comparativo eficiencia 5 días prototipo 2018 y 2019.

| CUADRO COMPRATIVO EFICIENCIA 5 DÍAS MUESTRA 1 VS PROTOTIPO 1 Y 2 | | | | | |
|--|---------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| LABORATORIO | UNIDADES | 5 DÍAS FASE 1 | 5 DÍAS FASE 2 | 5 DÍAS PROTOTIPO 1 2018 | 5 DÍAS PROTOTIPO 2 2018 |
| PH | --- | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta |
| CONDUCTIVIDAD | μs/cm | 37,7% | 40,9% | 20,0% | Parámetro aumenta |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | 60,8% |
| SALINIDAD | SAL | 33,3% | 33,3% | Permanece constante | Parámetro aumenta |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 37,3% | 40,4% | 20,4% | 20,4% |
| TEMPERATURA | °C | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta |
| TURBIEDAD | NTU | 99,3% | 97,7% | 92,3% | 90,1% |
| COLOR | PtCo | 95,4% | 95,5% | 89,4% | 76,7% |
| ALCALINIDAD | CaCo3/L | 54,7% | 58,4% | 48,0% | Permanece constante |
| | RIO ARZOBISPO | | | | |
| | CANAL DE CUND | | | | |

Fuente propia.

En la **Tabla 35. Cuadro Comparativo** , se evidencia que a los 5 días de recirculación el prototipo del año 2019 alcanzó mayores porcentajes de remoción en los parámetros de conductividad, salinidad, sólidos suspendidos, turbiedad, color y alcalinidad.

Esto demuestra que las modificaciones realizadas contribuyeron con la eficiencia del humedal en la depuración de aguas residuales.

Tabla 36. Cuadro Comparativo eficiencia 21 días muestra 1 vs prototipo 1 y 2.

| CUADRO COMPRATIVO EFICIENCIA 21 DÍAS MUESTRA 1 VS PROTOTIPO 1 Y 2 | | | | | |
|---|-----------|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| LABORATORIO | UNIDADES | 21 DÍAS FASE 1 | 21 DÍAS FASE 2 | 21 DÍAS PROTOTIPO 1 2018 | 21 DÍAS PROTOTIPO 2 2018 |
| PH | --- | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | 8,2% | Parámetro aumenta |
| CONDUCTIVIDAD | μs/cm | 18,2% | 19,7% | 36,7% | Parámetro aumenta |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | 60,8% |
| SALINIDAD | SAL | 16,7% | 16,7% | Permanece constante | Permanece constante |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 17,8% | 19,2% | 35,3% | Parámetro aumenta |
| TEMPERATURA | °C | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta | Parámetro aumenta |
| TURBIEDAD | NTU | 99,4% | 95,1% | 92,3% | 90,1% |
| COLOR | PtCo | 94,1% | 92,9% | 89,4% | 76,7% |
| ALCALINIDAD | CaCo3/L | 80,3% | 65,1% | 49,3% | Permanece constante |
| | RIO | | | | |
| | ARZOBISPO | | | | |
| | CANAL DE | | | | |
| | CUND | | | | |

Fuente propia.

De acuerdo con la **Tabla 36**, se evidencia que el prototipo 1 del años 2018 fue más óptimo disminuyendo los parámetros de conductividad y sólidos supendidos a los 21 días de recirculación, sin embargo los porcentajes removidos de turbiedad, color y alcalinidad fueron mayores en la muestra No.1 para la fase 1 y 2 .

9. CONCLUSIONES

- Se realiza el diagnóstico del humedal del año 2012 y 2018 donde se propone la mejora del humedal existente, con el fin de mejorar la calidad del agua a tratar, de modo que se escoge agua residual del canal de Cundinamarca para aumentar los niveles de contaminación y poder verificar si mejora la calidad del agua residual tratada a través del humedal artificial.
- La inclusión de la planta ornamental Anturio Blanco en el humedal artificial permitió obtener excelentes resultados en la depuración de los contaminantes presentes en el agua, principalmente hubo un elevado porcentaje de remoción de los parámetros DBO_5 en un 41% y 68% y DQO en un 70% y 77%; a su vez el comportamiento biológico de la planta fue favorable, pues no presentó afectaciones por la alta carga contaminante del agua del Canal de Cundinamarca.
- Al comparar los resultados de la fase 1 con la fase 2, se pudo determinar que es más eficiente la fase 2 ya que cuenta con un lecho filtrante y un Anturio blanco adicional, esta tuvo mejores resultados en la disminución de los parámetros de conductividad, salinidad, sólidos suspendidos totales y color.
- El rediseño del lecho filtrante en el humedal artificial fue favorable, debido a que la reorganización en forma de barreras (de grava y antracita) permitió que el agua residual recorriera uniformemente generando mayor limpieza y retención de material contaminante.
- La incorporación de una fase adicional a la existente permitió generar un efecto cascada en el sistema para aumentar la cantidad de oxígeno presente en el agua, esto facilitó a las plantas Anturio blanco y Junco común, la eliminación de la carga contaminante DBO_5 con un porcentaje de remoción de 68% y DQO con un porcentaje de remoción de 77% presente en el agua tratada en el humedal.
- Con la inclusión del flotador para la fase 1 y tanque, se garantiza que la bomba funcionará de acuerdo con el nivel del agua que presente el sistema, esto evitará daños de la misma y a su vez evitará que la fase 1 se desborde y genere pérdidas de agua en el laboratorio.
- De acuerdo con la normativa consultada en cuanto al reúso que se le puede dar al agua residual, se determina que el agua que se obtiene a los 5 días en la fase 2 de recirculación cumple con los parámetros de sólidos suspendidos totales que

establece la ONU, a su vez desde la entrada hasta los 21 días cumple con el pH máximo que establece la resolución 1207 y el decreto 1594 de 1984, también cumple con el nivel de conductividad que establece la resolución 1207 de 2014.

- De acuerdo con el análisis de remoción de las muestras 1 y 2 a los 5 días de recirculación, se encontró que la muestra No.1 presentó mayor porcentaje de remoción en los parámetros de conductividad con 40.9%, salinidad con 33%, sólidos suspendidos totales con 40.4%, turbiedad con 99.4% y color con 95.5% y la muestra No.2 presentó mayor remoción en los parámetros de color con 94.9% y turbiedad con 99.3%, se establece que fue más óptima la depuración a los 5 días de recirculación en la muestra No.1
- De acuerdo con los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio se puede verificar que la eficiencia de depuración del humedal es óptima a los 5 cinco días ya que hay mayor remoción de conductividad con 40.9%, salinidad con 33% y sólidos suspendidos con 40.4%, sin embargo, a los 21 días de recirculación existe mayor porcentaje de remoción de turbiedad con 99.4% y alcalinidad con 80.27% pero aumentan los sólidos suspendidos, conductividad y salinidad.
- Se realizó la comparación de los resultados que se obtuvieron en este rediseño con el realizado en el año 2018, de acuerdo con la comparación de eficiencia en remoción, se encontró un mayor porcentaje de remoción en este rediseño para los siguientes parámetros: conductividad con 40.9%, sólidos suspendidos totales con 40.4%, turbiedad con 99.3%, color con 95.4% y alcalinidad con 58.4%. De acuerdo con esto se afirma que este rediseño mejoró la eficiencia del humedal artificial en el tratamiento de aguas residuales.
- El proceso que realiza el humedal es un paso para la optimización de energía en las plantas de tratamiento PTAR, ya que como se evidencia en los resultados es muy eficiente en la remoción de materia orgánica en cuanto al DBO₅, DQO, turbiedad y color.
- Emplear humedales artificiales con plantas ornamentales y juncos es una buena opción que se puede implementar en los canales que transportan aguas residuales para que el agua que es depositada allí tenga un tratamiento secundario antes de llegar a los cuerpos hídricos tales como el río Bogotá, esto con el fin de minimizar el impacto ambiental y la contaminación del cuerpo hídrico.
- El rediseño de forma didáctica permite que los docentes y estudiantes puedan interactuar y conocer el funcionamiento y la importancia del humedal artificial.

10.RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos de DBO_5 y DQO a los 5 días de recirculación del agua residual en el humedal artificial para analizar si en esta etapa se alcanza una remoción superior a la alcanzada a los 21 días, para ello debe emplearse agua residual de la misma fuente (canal de Cundinamarca).
- El laboratorio no cuenta con los recursos necesarios para medir los parámetros de aguas residuales, lo cual ocasiona que se realice un gasto para los estudiantes de proyecto de grado y no se puedan medir todos los parámetros de calidad de agua por cuestiones económicas.
- Los estudiantes de ingeniería civil de la Universidad Católica podrían realizar ensayos de compactación de suelos con el agua residual obtenida del humedal, ya sea a las 2 horas, 5 o 21 días de recirculación, para establecer si el agua empleada puede cumplir con los resultados que exige la norma Invias y a su vez reutilizarla en el campo de la ingeniería.
- Se evidencia un sesgo en las mediciones de pH, debido a que en el laboratorio AllChem reportaron datos de pH de una de las muestras de agua residual, diferentes a los tomados en el laboratorio de la universidad, por lo tanto, para tener resultados más precisos, se debería realizar una calibración constante a los equipos.
- Se recomienda que el laboratorio de plantas cuente con un espacio que sea exclusivo para realizar los trabajos de investigación, pues al mezclar trabajos de grado con otras asignaturas, se limita la oportunidad de hacer un seguimiento como es debido al trabajo de investigación.
- La universidad no cuenta con el equipo necesario para determinar la carga contaminante que tiene el agua residual empleada, esto es un problema a la hora de hacer los ensayos pues se tiene que disponer de una entidad externa para llevar a cabo un adecuado proceso de caracterización de agua. Se recomienda que la universidad católica permita que a futuro los estudiantes puedan realizar estos laboratorios con los equipos y reactivos adecuados.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Acueducto de Bogotá. (2011). Acueducto de Bogotá. Recuperado de https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB/anutsecsecundaria/notbosaabril2013/!ut/p/z1/rVLBcolwFPwWDxw1z6BlekPb0TqjnbGtQi6dAAHSQoIQRfv1TevJUet0bCaHvJfdnc3Llop8RCXbipRpoSTLTR1Q542Qe6-LAc_HE2KDt1zgR-9IBNAFtEQU0TISMQowxE7cB-glPQKJy8iA8SQh7oA4fZe44TcykrrUGQo
- AGUASRESIDUALES.INFO. (2015). Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Conceptos e historia. Recuperado 27 de marzo de 2019, de <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/humedales-artificiales-como-sistemas-naturales-de-depuracion-de-aguas-residuales-conceptos-e-historia>
- Alejandra Méndez. (2014). *Uso de plantas ornamentales en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Recuperado de http://aleph.ecosur.mx:8991/exlibris/aleph/a22_1/apache_media/7V7G9HLBX897V9RJAHM63KSETQLTJB.pdf
- Banrepcultural. (2017). Filtro de agua - Enciclopedia | Banrepcultural. Recuperado 28 de marzo de 2019, de http://enciclopedia.banrepcultural.org/index.php/Filtro_de_agua
- bidatek. (2017). Depuración ecológica mediante Humedales Artificiales Subsuperficiales. Recuperado 5 de mayo de 2019, de <https://www.bidatek.com/humedales/>
- BioCOte. (2014). Microorganisms: An introduction - BioCote. Recuperado 31 de marzo de 2019, de <https://www.biocote.com/blog/microorganisms-an-introduction/>
- Carbotecnia. (2014). ¿Qué es el pH del agua? Purificación . Recuperado 26 de octubre de 2019, de <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-ph-del-agua/>
- Charry, M., & Achipiz, N. (2012). *Modelo didáctico para simular funcionamiento en un humedal*. Universidad Católica de Colombia.
- CORMACARENA. (2010). Volumen 1: Objetivos y criterios de calidad del agua. *Formulación del Plan de Ordenamiento de las Fuentes Hídricas Priorizadas en Jurisdicción de CORMACARENA*.
- De Farmacia, F., & Sanz, S. B. (2015). *APLICACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN A SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS*. Recuperado de <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/BAYÓN SANZ, SARA.pdf>
- De jardín Revista Colombiana de jardinería. (2018). *Los Anturios* .
- División de salud pública de Carolina del Norte. (2009). *Las bacterias coliformes*.

Recuperado de www.ncdhhs.gov/espanol

Enrique, P.-S. J., Carlos, M.-P. A., & Javier, M.-V. (s. f.). *BIORREMEDIACIÓN: CASO HELICONA PSITTACORUM (HELICONIACEA) BIOPROSPECTING OF NATIVE PLANTS FOR THEIR USE IN BIOREMEDIATION PROCESS: HELICONIA PSITTACORUM CASE (HELICONIACEAE) CIENCIAS NATURALES*.

Enrique, P.-S. J., Carlos, M.-P. A., & Javier, M.-V. (2013a). *BIORREMEDIACIÓN: CASO HELICONA PSITTACORUM (HELICONIACEA) BIOPROSPECTING OF NATIVE PLANTS FOR THEIR USE IN BIOREMEDIATION PROCESS: HELICONIA PSITTACORUM CASE (HELICONIACEAE) CIENCIAS NATURALES*. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a04.pdf>

Enrique, P.-S. J., Carlos, M.-P. A., & Javier, M.-V. (2013b). *BIORREMEDIACIÓN: CASO HELICONA PSITTACORUM (HELICONIACEA) BIOPROSPECTING OF NATIVE PLANTS FOR THEIR USE IN BIOREMEDIATION PROCESS: HELICONIA PSITTACORUM CASE (HELICONIACEAE) CIENCIAS NATURALES*.

Eugenia de la Peña Jorge Ducci Viridiana Zamora, M. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*.

Facsa. (2017). La dureza del agua . Recuperado 11 de octubre de 2019, de [https://www.facsa.com/la-dureza-del-agua/#targetText=Se denomina dureza del agua,contiene en muy poca cantidad](https://www.facsa.com/la-dureza-del-agua/#targetText=Se%20denomina%20dureza%20del%20agua,contiene%20en%20muy%20poca%20cantidad).

Fluence. (2016). ¿Qué es el Carbón Activado? . Recuperado 16 de octubre de 2019, de <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-carbon-activado/>

Fluence. (2017). Purificación de Agua y Sólidos Disueltos . Recuperado 11 de octubre de 2019, de <https://www.fluencecorp.com/es/purificacion-de-agua-y-solidos-disueltos/>

Fundación humdales de Bogotá. (2019). Plantas acuáticas en los Humedales de Bogotá. Recuperado 5 de mayo de 2019, de <http://humedalesbogota.com/2012/08/01/plantas-acuaticas-en-los-humedales-de-bogota/>

García-Tejera, O., López-Bernal, Á., Villalobos, F. J., Orgaz, F., & Testi, L. (2016). La temperatura del suelo afecta a la absorción del agua de los árboles. *Tree Physiology*, 36(4), 469-478. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv126>

García, M. E., Pérez, J. A., & Generalidades, L. (2019). *AGUAS RESIDUALES. COMPOSICIÓN*. Recuperado de http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

- GeoEnciclopedia. (2019). Humedales - Información y Características - Geografía. Recuperado 26 de marzo de 2019, de <https://www.geoenciclopedia.com/humedales/>
- Geotextiles. (2012).
- Goyenola, G. (2007). *Determinación de la acalinidad Total*. 6-8. Recuperado de http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/alcalinidad.pdf
- Grava | Qué es, usos, características, diferenciación, obtención | Triturada, redondeada. (2016).
- Gricelda, M., Argueta, Q., Optar, P., De, A. G., Salvador, S., Salvador, E. L., & America, C. (2012). *Desarrollo de un microhumedal artificial para el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario*. Recuperado de http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2101/1/DESARROLLO_DE_UN_MICROHUMEDAL_ARTIFICIAL_PARA_EL_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_DE_TIPO_ORDINARI.pdf
- HACH COMPANY. (2017). *¿Qué es la conductividad?*
- Hunker. (2019). List of Ornamental Plants | Hunker. Recuperado 31 de marzo de 2019, de <https://www.hunker.com/12261439/list-of-ornamental-plants>
- iAgua. (2019). Agua dura: ¿qué es y cómo me afecta? |. Recuperado 26 de octubre de 2019, de <https://www.iagua.es/blogs/tecdepur/agua-dura-¿que-es-y-como-me-afecta>
- IDEAM. (2007). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, A. y P. (Mexico), Valdés-Casillas, C., Cadena-Cárdenas, L., Romero-Hernández, S., Silva-Mendizábal, S., González-Pérez, G., ... Aguilera-Márquez, D. (2011). Revista mexicana de ciencias agrícolas. En *Revista mexicana de ciencias agrícolas* (Vol. 2, pp. 97-111). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Jorge Manuel Escobar Moreno. (2012). Plantas acuáticas en los Humedales de Bogotá. Recuperado 26 de marzo de 2019, de <http://humedalesbogota.com/2012/08/01/plantas-acuaticas-en-los-humedales-de-bogota/>
- Laboratorio de química ambiental. (1997). DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO. Recuperado 26 de marzo de 2019, de http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Determinacion_de_DB_O5.htm

- Leidy Carolina Gómez Ramirez Jeyson Gonzalo García Echavarría. (2018). *Leidy Carolina Gómez Ramirez Jeyson Gonzalo García Echavarría Universidad Católica De Colombia Facultad De Ingeniería, Departamento De Ingeniería Civil Programa. De Ingeniería Civil Bogotá D.C 2018.*
- LENNTECH. (2019). Peligro de salinidad en el agua de irrigación. Recuperado 26 de octubre de 2019, de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/riego/salinidad/riesgo-salinidad-regadio.htm#ixzz63U0aK1Nc>
- LOPERA, M. J., & CAMPOS, S. M. (2011). *DESARROLLO DE CAPACIDADES EN EL USO SEGURO DE AGUAS RESIDUALES PARA AGRICULTURA*. (7), 22.
- Luna-Pabello, V. M., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP*, 17(1), 32-55. [https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(14\)70318-3](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(14)70318-3)
- Maria, M., & Castellanos, L. (2018). *REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES Y REÚSO: MODELO DIDÁCTICO LABORATORIO DE RECURSOS HÍDRICOS UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA MARIA*. 121.
- Martínez, M. M. M. (2013). *Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Conceptos e historia*. Recuperado de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/05/16/131891>
- Ministerio de agricultura. (1984). *Decreto 1594 de 1984*. (Alexander 1975), 576.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *RESOLUCION-1207-DE-2014-REUSO.pdf*.
- National Geographic society. (2019). sediment | National Geographic Society. Recuperado 31 de marzo de 2019, de <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/sediment/>
- New World Encyclopedia. (2015). Sewage treatment.
- Nihon Kasetsu Europe. (2017). DBO y DQO para caracterizar aguas residuales -. Recuperado 26 de octubre de 2019, de <http://nihonkasetsu.com/es/dbo-y-dqo-para-caracterizar-aguas-residuales/>
- Noguera, K. (2017). Requisitos de la calidad del agua según sus usos. Recuperado 26 de octubre de 2019, de <https://es.slideshare.net/KevinNogueraJurado/requisitos-de-la-calidad-del-agua-segn-sus-usos>
- Peña, C., & Guzmán, A. (2012). *TRATAMIENTO DE AGUAS DE ESCORRENTÍA MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES: ESTADO DEL ARTE/A RUN-OFF TREATMENT BY MADE WETLANDS - A REVIEW*. 22, 39-61.



- RALCEA. (2013). *Aprovechamiento y Reuso de Aguas Residuales Tecnologías de tratamiento de Aguas Residuales para Reuso RALCEA-Agosto 2013 CETA Instituto de la Universidad de Buenos Aires*. Recuperado de https://fch.cl/wp-content/uploads/2013/09/2_Aprovechamiento.pdf
- Rodríguez-Miranda, J. P., Gómez, E., Garavito, L., & López, F. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. En *Tecnología y Ciencias del Agua: Vol. I* (pp. 59-68). Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531968005>
- ScienceDirect. (2019). Heavy Metal - an overview | ScienceDirect Topics. Recuperado 31 de marzo de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/heavy-metal>
- Sigurdur Greipsson (Department of Biology & Physics, K. S. U. (2011). Phytoremediation. *Nature Biotechnology*, 15(2), 127-128. <https://doi.org/10.1038/nbt0297-127>
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). *Reuso de agua residuales domésticas en agricultura*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180314732020>
- SSWM Sustainable sanitation and water management. (2019). Introducción a Sistemas de Saneamiento | SSWM. Recuperado 26 de marzo de 2019, de <http://archive.sswm.info/es/category/step-gass-en-al/gass-en-castellano/gestión-de-agua-y-saneamiento-sostenible-en-américa-l-18>
- Vargas León, L. A. (2015). *Prototipo Para La Recolección Y Reutilización De Aguas Residuales En La Sede Del Claustro De La Universidad Católica De Colombia*. 1-90.
- Rojas, Jairo Alberto Romero. 2002. *Calidad del Agua*. Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería , 2002.

12. ANEXOS

12.1. Ensayos de laboratorio

Tabla 37. Ensayos DBO₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA Entrada al humedal muestra 1



TRANSVERSAL 39 N° 20A - 72 TELÉFONO: 7450682 Bogotá, D.C. www.allchem.com.co

LABORATORIO DE ANÁLISIS, ENSAYOS Y ASESORÍAS

Bogotá 26 de agosto, 2019 Informe de Resultados INF - 1904750-0
Página 1 de 1

Nombre: CACERES SERRATO ANDREA - 1015467249
 Dirección: DIAGONAL 46 A 16 26 Teléfono: 3044795868
 Muestras suministradas por: Ing. Andrea Caceres
 Fecha de recepción: 16 de agosto, 2019 Proced. de Muestreo: Puntual
 Fecha toma de muestra: 16 de agosto, 2019 08:00
Canal de Cundinamarca

Descripción: Agua superficial

Lote: N.R

No. de Ingreso: H161119

| Análisis Realizado | Métodos | Técnicas | Unidades | Resultado |
|--------------------|----------------------------|----------------|---------------------|-----------|
| DBO-5 Aguas | SM 5210 B - SM 4500 O G | Electrométrico | mgO ₂ /L | 141.15 |
| DQO Aguas | SM 5220 B | Titulación | mgO ₂ /L | 498.82 |

* Muestra tomada por el cliente.

FIN DE INFORME

Fuente propia.



Tabla 38. Ensayos DBO₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA a los 21 días

Muestra 1



TRANSVERSAL 39 N° 20A - 72 TELÉFONO: 7450882 Bogotá, D.C. www.allchem.com.co

LABORATORIO DE ANÁLISIS, ENSAYOS Y ASESORÍAS

Informe de Resultados

INF - 1905343-0

Bogotá 23 de septiembre, 2019

Página 1 de 1

Nombre: CACERES SERRATO ANDREA - 1015467249
Dirección: DIAGONAL 46 A 16 26 Teléfono: 3044795868
Muestras suministradas por: Ing. Andrea Caceres
Fecha de recepción: 07 de septiembre, 2019 Proced. de Muestreo: Puntual
Fecha toma de muestra: 06 de septiembre, 2019 08:00
Humedal artificial

Descripción: Agua residual tratada

Lote: N.R

No. de Ingreso: I070219

| Análisis Realizado | Métodos | Técnicas | Unidades | Resultado |
|--------------------|----------------------------|----------------|---------------------|-----------|
| DBO-5 Aguas | SM 5210 B - SM 4500 O G | Electrométrico | mgO ₂ /L | 83.19 |
| DQO Aguas | SM 5220 B | Titulación | mgO ₂ /L | 151.47 |

* Muestra tomada por el cliente.

FIN DE INFORME

Fuente propia.

Tabla 39. Ensayos DBO₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA Entrada al humedal muestra 2



TRANSVERSAL 39 N° 20A - 72 TELÉFONO: 7450682 Bogotá, D.C. www.allchem.com.co

LABORATORIO DE ANÁLISIS, ENSAYOS Y ASESORÍAS

Bogotá 23 de septiembre, 2019 Informe de Resultados INF - 1905342-0
Página 1 de 1

Nombre: CACERES SERRATO ANDREA - 1015467249
Dirección: DIAGONAL 46 A 16 26 Teléfono: 3044795868
Muestras suministradas por: Ing. Andrea Caceres
Fecha de recepción: 07 de septiembre, 2019 Proced. de Muestreo: Puntual
Fecha toma de muestra: 07 de septiembre, 2019 07:00
Canal de Cundinamarca

Descripción: Agua residual no domestica

Lote: N.R

No. de Ingreso: I070119

| Análisis Realizado | Métodos | Técnicas | Unidades | Resultado |
|--------------------|----------------------------|----------------|---------------------|-----------|
| DBO-5 Aguas | SM 5210 B - SM 4500 O G | Electrométrico | mgO ₂ /L | 282.13 |
| DQO Aguas | SM 5220 B | Titulación | mgO ₂ /L | 529.99 |

* Muestra tomada por el cliente.

FIN DE INFORME

Fuente propia.

Tabla 40. Ensayos DBO₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA a los 21 días

Muestra 2



TRANSVERSAL 39 N° 20A - 72 TELÉFONO: 7450682 Bogotá, D.C. www.allchem.com.co

LABORATORIO DE ANÁLISIS, ENSAYOS Y ASESORÍAS

Informe de Resultados

INF - 1905923-0

Bogotá 10 de octubre, 2019

Página 1 de 1

Nombre: CACERES SERRATO ANDREA - 1015467249
 Dirección: DIAGONAL 46 A 16 26 Teléfono: 3044795868
 Muestras suministradas por: Ing. Andrea Caceres
 Fecha de recepción: 25 de septiembre, 2019 Proced. de Muestreo: Puntual
 Fecha toma de muestra: 25 de septiembre, 2019 04:00
Humedal Artificial

Descripción: Agua Residual Tratada

Lote: N.R

No. de Ingreso: I250719

| Análisis Realizado | Métodos | Técnicas | Unidades | Resultado |
|--------------------|----------------------------|-------------------|---------------------|-----------|
| DBO-5 Aguas | SM 5210 B - SM 4500 O G | Electrométrico | mgO ₂ /L | 90.21 |
| DQO Aguas | SM 5220 B | Titulación | mgO ₂ /L | 120.29 |
| Hierro AA Aguas | SM 3111-B | Absorción atómica | mgFe/L | <0.2 |

* Muestra tomada por el cliente.

FIN DE INFORME

Fuente propia.

Tabla 41. Ensayos de laboratorio realizados en la universidad católica de Colombia - muestra 1

RESULTADOS DE LABORATORIO

| MUESTRA 1 DE AGUA CANAL DE CUNDINAMARCA | | | | | | | |
|---|---------------|-----------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|
| LABORATORIO | UNIDADES | ENTRADA | 2 HORAS | 5 DIAS | | 21 DIAS | |
| | | | | FASE 1 | FASE 2 | FASE 1 | FASE 2 |
| PH | --- | 7.06 | 7.66 | 7.08 | 7.67 | 7.51 | 7.63 |
| CONDUCTIVIDAD | μs/cm | 1387 | 882 | 864 | 820 | 1135 | 1114 |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | 725 | 1132 | 1167 | 1217 | 882 | 897 |
| SALINIDAD | SAL | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 735 | 472 | 461 | 438 | 604 | 594 |
| TEMPERATURA | °C | 15.1 | 14.6 | 18 | 17.9 | 17.3 | 17.6 |
| TURBIEDAD | NTU | 134 | 19.5 | 0.906 | 3.14 | 0.79 | 6.61 |
| COLOR | PtCo | 1952 | 355 | 89 | 88 | 115 | 139 |
| DUREZA TOTAL | mg/L | 170 | 170 | 190 | 180 | 306 | 324 |
| DUREZA Calcio | mg/L | La absorbancia es muy densa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DUREZA Magnesio | mg/L | La absorbancia es muy densa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ALCALINIDAD | mg/L de CaCo3 | 375 | 202 | 170 | 156 | 74 | 131 |
| HIERRO | mg/L de Fe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente propia.

Tabla 42. Ensayos de laboratorio realizados en la universidad católica de Colombia- muestra 2

RESULTADOS DE LABORATORIO

| MUESTRA 2 DE AGUA CANAL DE CUNDINAMARCA | | | | | | | |
|---|---------------|-----------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|
| DETALLE | UNIDADES | ENTRADA | 2 HORAS | 5 DIAS | | 21 DIAS | |
| | | | | FASE 1 | FASE 2 | FASE 1 | FASE 2 |
| PH | --- | 7.27 | 7.58 | 8.15 | 8.13 | 7.98 | 7.57 |
| CONDUCTIVIDAD | µs/cm | 1308 | 1153 | 1284 | 1284 | 1310 | 1260 |
| RESISTIVIDAD | Ω. Cm | 764 | 867 | 779 | 779 | 761 | 791 |
| SALINIDAD | SAL | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| TDS (SOLIDOS SUSPENDIDOS) | mg/L | 700 | 615 | 686 | 686 | 704 | 675 |
| TEMPERATURA | °C | 17.1 | 18.5 | 19.5 | 19.5 | 20.5 | 20.3 |
| TURBIEDAD | NTU | 136 | 9.69 | 1.1 | 1 | 45.3 | 7.72 |
| COLOR | PtCo | 2385 | 272 | 122 | 128 | 417 | 166 |
| DUREZA TOTAL | mg/L | 306 | 324 | 332 | 328 | 400 | 360 |
| DUREZA Calcio | mg/L | La absorbancia es muy densa | 0 | -0.07 | 0.12 | 0 | 0 |
| DUREZA Magnesio | mg/L | La absorbancia es muy densa | 0 | 0.02 | 1.4 | 0 | 0 |
| ALCALINIDAD | mg/L de CaCo3 | 287 | 318 | 350 | 315 | 310 | 300 |
| HIERRO | mg/L de Fe | 0.37 | 0.35 | 0.25 | 0.22 | 0.11 | 0.2 |

Fuente propia.

12.2. Registro fotográfico

Ilustración 51. Laboratorios DBO₅ y DQO compañía ALLCHEM LTDA.






Fuente propia.






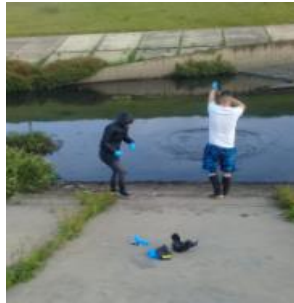
En la **Ilustración 51**, se presenta el registro fotográfico de los ensayos de DBO₅ y DQO suministrados por la compañía ALLCHEM LTDA.

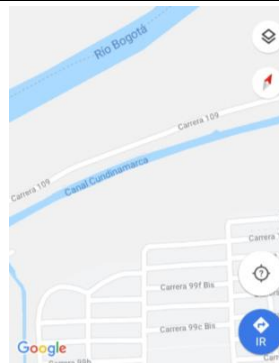
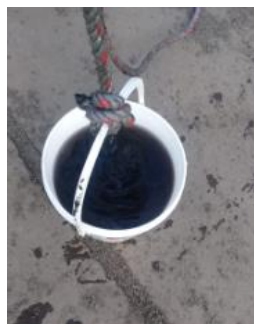
Ilustraciones 52. Laboratorios realizados en la universidad.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL | | |
|  |  |  |
| REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL | | |
|  |  | |
| RETIRO DE MATERIAL | | |
|  |  |  |
| INSTALACIÓN DE GEOTEXTIL | INSTALACION DE GRAVA | INSTALACION DE ARENA PARA LAS PLANTAS |



| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL | | |
|  |  |  |
| REDISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL | | |

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| REALIZACION DE ORIFICIOS PARA SALIDA DE AGUA | FASE I | MONTAJE FINAL |
|  |  |  |



RECOLECCIÓN MUESTRA CANAL DE CUNDINAMARCA (16 AGOSTO 2019)



ADICIÓN DE AGUA CONTAMINADA A HUMEDAL ARTIFICIAL (17 AGOSTO 2019)



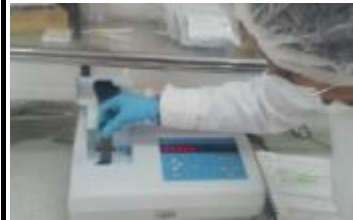
ADICIÓN DE AGUA CONTAMINADA A HUMEDAL ARTIFICIAL (17 AGOSTO 2019)



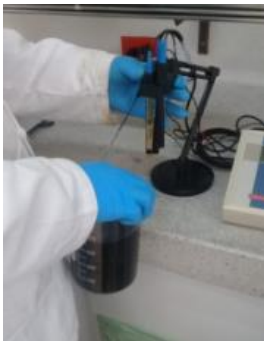
ADICIÓN DE AGUA CONTAMINADA A HUMEDAL ARTIFICIAL (17 AGOSTO 2019)



ADICIÓN DE AGUA CONTAMINADA A HUMEDAL ARTIFICIAL (17 AGOSTO 2019)



ADICIÓN DE AGUA CONTAMINADA A HUMEDAL ARTIFICIAL (17 AGOSTO 2019)



ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL (17 AGOSTO 2019)



ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL (17 AGOSTO 2019)



ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL (17 AGOSTO 2019)



ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL (17 AGOSTO 2019)



ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL (17 AGOSTO 2019)



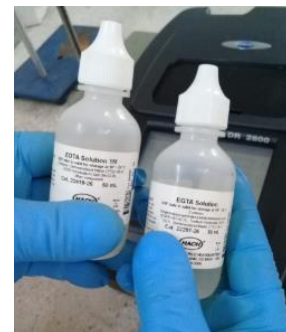
ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL





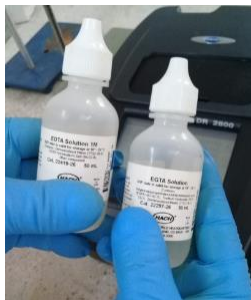

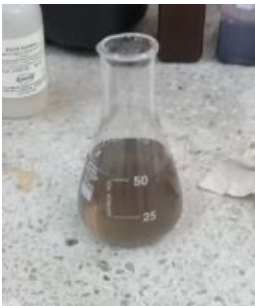
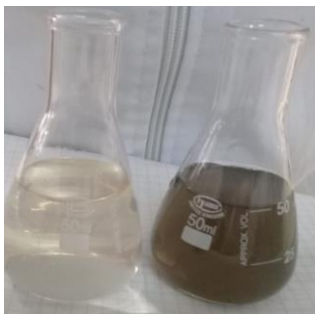

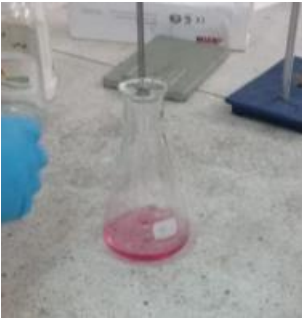




TOMA DE DATOS

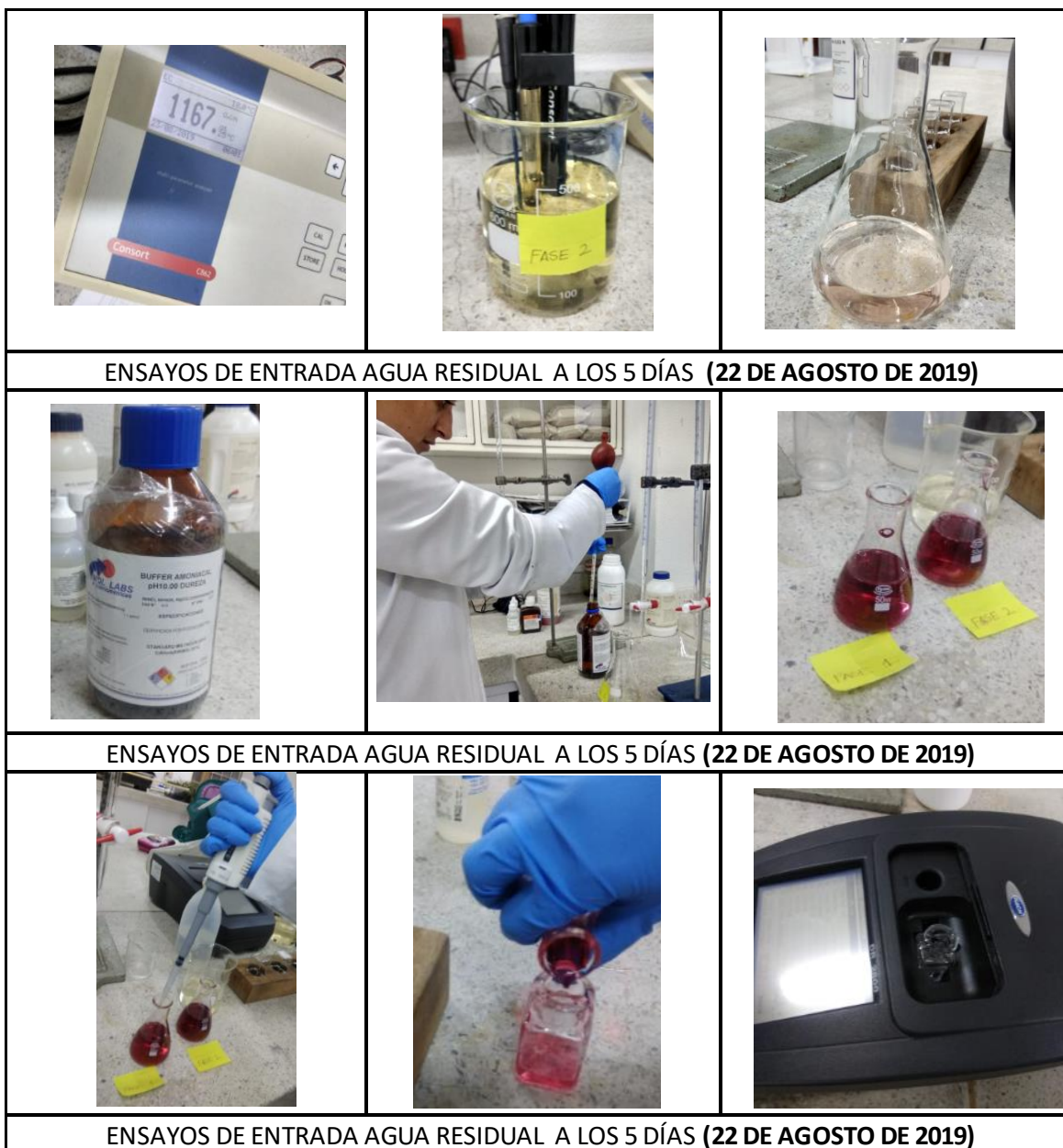


ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL



ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL

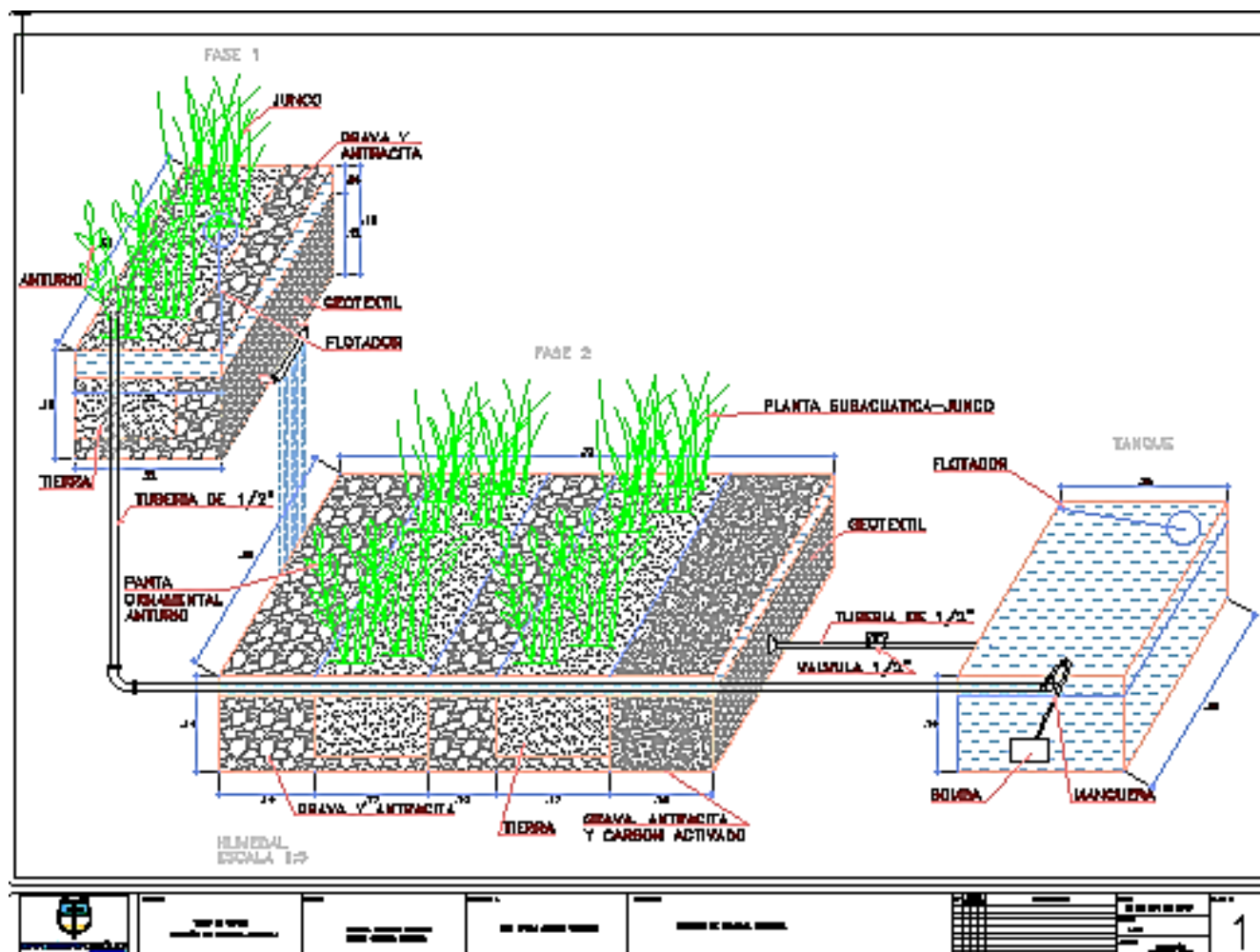
| | | |
|---|--|---|
|  |  |  |
| ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL | | |
|  |  |  |
| ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL Y A LAS DOS HORAS | | |
|  |  |  |
| ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL Y A LAS DOS HORAS | | |
|  |  |  |
| ENSAYOS DE ENTRADA AGUA RESIDUAL A LOS 5 DÍAS (22 DE AGOSTO DE 2019) | | |



Fuente propia.

En la **Ilustraciones 52** se presenta el registro fotográfico de los realizados en el laboratorio de la universidad católica de Colombia.

12.3. Plano de rediseño humedal artificial (Ver plano anexo)



Fuente propia.